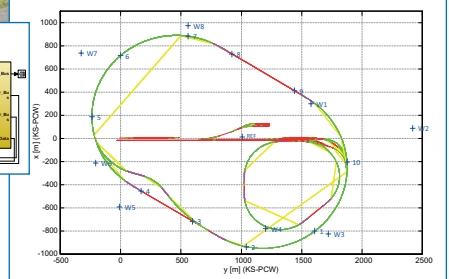
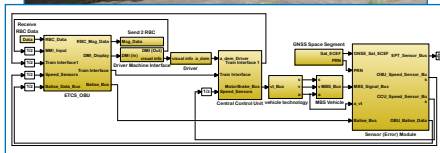
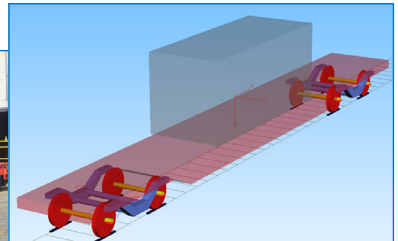


Schienenfahrzeug- und Umgebungssimulation mit absolutem Raum- und Zeitbezug



Schienenfahrzeug- und Umgebungssimulation mit absolutem Raum- und Zeitbezug

Railway and Environment Simulation Method
with Earth-fixed Reference and Absolute Time Reference

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen
Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Daniel Lüdicke

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Torsten Dellmann
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Abel

Tag der mündlichen Prüfung: 16.04.2018

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

Berichte aus der Fahrzeugtechnik

Daniel Lüdike

**Schienenfahrzeug- und Umgebungssimulation
mit absolutem Raum- und Zeitbezug**

Railway and Environment Simulation Method with
Earth-fixed Reference and Absolute Time Reference


Shaker Verlag
Aachen 2018

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2018)

DOI:10.18154/RWTH-2018-225566

Daniel Lüdicke  <https://orcid.org/0000-0001-7682-1014>

Die Informationen in diesem Buch wurden mit größter Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden. Der Autor und ggf. Übersetzer übernehmen keine juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für eventuell verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

Copyright Shaker Verlag 2018

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

1. Auflage 2018

ISBN 978-3-8440-6056-0

ISSN 0945-0742

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme der Universität RWTH Aachen.

Besonders danken möchte ich meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Torsten Dellmann für seine stetige Förderung dieser Arbeit. Sein fachliches und persönliches Engagement in den Forschungsprojekten war mir eine große Unterstützung. Herrn Prof. Dr.-Ing. Dirk Abel danke ich für das Koreferat und für den erfolgreichen Entwicklungsverlauf der Forschungsprojekte Galileo-above und SiPoS-Rail. Für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Lutz Eckstein bedanken. Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Schindler als neuen Leiter des Institutes für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme (ifs) danke ich für seine Mitwirkung an der Promotionsprüfung sowie für sein Engagement bei der Weiterentwicklung des Versuchsfahrzeuges „IFS-Erprobungsträger 1“.

Meinen Bürokollegen Florian Eßer, Andreas Schütz und Dr. Marcel Hermanns danke ich für die jahrelange gute Zusammenarbeit, die wertvollen Diskussionen und die tatkräftige Unterstützung bei allen praktischen und theoretischen Arbeiten. Einen großen Dank richte ich auch an Anna-Kaisa Jennes und Claudia Neubauer im Sekretariat des IFS sowie Renate Emmerich im Zeichenbüro für die immer freundlichen und aufbauenden Worte. Für die gute Zusammenarbeit und das große Engagement am IFS-Erprobungsträger möchte ich mich bei meinem Kollegen Thomas Holeczek in der Elektrowerkstatt sowie Herrn Klaus Pohlmann und Herrn Werner Woyda in der Mechanikwerkstatt bedanken. Die vielen Studenten, die mich während meiner Zeit am IFS durch Arbeiten sehr unterstützt haben, sind in Kapitel 9.1 erwähnt. Auch den HiWis Philipp Ihling, IT-Administration, sowie Adam Czaja und Sven Scheres, IFS-Erprobungsträger, möchte ich für die langjährige und unermüdliche Unterstützung danken.

Großer Dank gebührt auch den Kollegen vom Siemens Test- und Validationcenter in Wegberg-Wildenrath für die sehr gute Zusammenarbeit und die große Unterstützung bei den Testfahrten des IFS-Erprobungsträgers.

Allen Kollegen, Freunden und Personen, die mich während meiner Zeit in Aachen sehr unterstützt haben und ich hier leider nicht alle nennen konnte, möchte ich auch Danke! sagen.

Meinem jetzigen Arbeitgeber, dem Institut für Systemdynamik und Regelungstechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR), und besonders Herrn Dr. Andreas Heckmann danke ich für die Zeit, die Möglichkeit und das Vertrauen meine Arbeit in diesem Umfang und dieser Qualität fertigstellen zu können.

Sehr dankbar bin ich meinen Eltern für ihre große und verlässliche Unterstützung, die stetige Motivation und das große Vertrauen, das sie mir auf meinem gesamten Lebens- und Bildungsweg mitgegeben haben.

Ganz besonderen Dank für ihr großes Verständnis, ihre Rücksichtnahme und Unterstützung möchte ich an meine liebe Frau Tina und unsere lieben Kinder Theresa Lupita und Hendrik Lautaro richten. Ihr seid mir immer eine große Freude, eine wertvolle Bereicherung und ein wichtiger Ausgleich.

Aachen im Juli 2018, Daniel Lüdicke

Inhaltsübersicht

Vorwort.....	I
Inhaltsübersicht	III
Inhaltsverzeichnis	VII
Kurzfassung	XVII
Abstract	XIX
1 Einleitung und Motivation.....	1
1.1 Ziel der Arbeit	3
1.2 Gliederung der Arbeit.....	4
2 Grundlagen und Stand der Technik.....	5
2.1 Eisenbahninfrastruktur	5
2.2 Zugleit- und Zugsicherungstechnik mit ERTMS/ETCS	8
2.3 Aufbau eines Schienenfahrzeuges.....	18
2.4 Konventionelle Odometriesysteme und Bewegungssensorik.....	19
2.5 Geodätische Grundlagen	24
2.6 Satellitennavigation	30
3 Stand der Forschung im Bahnbereich.....	37
3.1 Simulationen im Bahnbereich	37
3.2 Erweiterte Odometrie und Satellitennavigation im Eisenbahnbereich	42
3.3 Eisenbahntestgebiete	47
3.4 Eisenbahnversuchsfahrzeuge	50
4 Simulationsumgebung Basissoftware	55
4.1 Zielsetzung und Anforderungen an die Simulationsumgebung	56
4.2 Softwarearchitektur	59
4.3 Szenariosteuerung und Simulationsablauf	61
4.4 Streckenatlas-Server.....	62
4.5 Szenario-Live-Viewer	63
4.6 Systematik der Koordinatensysteme	64

4.7	Erzeugung von Szenariodaten, Strecken- und Fahrplandefinition	65
5	Modellbeschreibung.....	73
5.1	Das Schienenfahrzeugmodell und das Simulink-Zentralmodell	74
5.2	Software-in-the-Loop-Architektur und Schnittstelle zum Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“	78
5.3	Software-Module zur Eisenbahninfrastruktur.....	79
5.4	ETCS-Fahrzeugausrüstung	80
5.5	Triebfahrzeugführer -Modell	91
5.6	Zentralsteuergerät (ZSG)	95
5.7	Fahrzeugtechnik – Struktur der Bewegungsmodelle	97
5.8	Dreidimensionales Schienenfahrzeug- und Umgebungsmodell der Mehrkörpersimulation.....	102
5.9	Modellsystematik der Schienenfahrzeugsensorik.....	108
5.10	Eindimensionale Bewegungssensorik am Schienenfahrzeug	111
5.11	Umgebungsfeste 3D-Sensorik (Wegmarken)	118
5.12	Fahrzeugfeste 3D-Sensorik	125
5.13	Satellitennavigation-Simulation.....	130
5.14	Implementierte Streckendefinitionen.....	145
6	Validierung der Simulationsumgebung	149
6.1	Beschreibung der Testfahrt des IFS-Erprobungsträgers	149
6.2	Beschreibung des Simulationsszenarios	151
6.3	Situation an Wegmarke 7	153
6.4	Positionsabweichung über der gesamten Messfahrt	156
6.5	Positionsabweichungen an den Wegmarken.....	158
6.6	Bewertung der Validierungsergebnisse	159
7	Simulationsergebnisse.....	161
7.1	Analyse der Grundfunktionen der Simulationsumgebung.....	161
7.2	Analyse der Sensoriksimulation und des Sensor-Fehler-Moduls	175
7.3	Analyse des Satellitennavigationsmodells	192
7.4	Bewertung der Simulationsergebnisse	202
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	207
8.1	Zusammenfassung und Diskussion.....	207
8.2	Ausblick	211
8.3	Weitere Vorschläge zur Anknüpfung an diese Arbeit	212

9	Verzeichnisse und Angaben.....	215
9.1	Literaturverzeichnisse	215
9.2	Symbolverzeichnisse	230
9.3	Abbildungsverzeichnis	253
9.4	Tabellenverzeichnis.....	260
9.5	Anmerkungen	260
Anhang.....		261
A	Vollbahn-Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“	262
B	Details der Konfiguration zu den Ergebniskapiteln Kapitel 6 und Kapitel 7	305
C	Ergänzungen und Details zu den Simulationsergebnissen in Abschnitt 7.3	321
D	Ergänzende Kapitel zur Simulationsumgebung	332

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	I
Inhaltsübersicht	III
Inhaltsverzeichnis	VII
Kurzfassung	XVII
Abstract	XIX
1 Einleitung und Motivation.....	1
1.1 Ziel der Arbeit	3
1.2 Gliederung der Arbeit.....	4
2 Grundlagen und Stand der Technik.....	5
2.1 Eisenbahninfrastruktur	5
2.2 Zugleit- und Zugsicherungstechnik mit ERTMS/ETCS.....	8
2.2.1 ETCS-Streckenzentrale / ETCS Radio Block Center.....	11
2.2.2 ETCS-Fahrzeugausrüstung.....	12
2.2.3 ETCS-Fahrerstandsanzeige (ETCS Driver Machine Interface, DMI)	13
2.2.4 Kommunikation über GSM-R und EURORADIO	14
2.2.5 ETCS-Eurobalise	14
2.2.6 Datenformat der ETCS-Kommunikation	16
2.3 Aufbau eines Schienenfahrzeuges	18
2.4 Konventionelle Odometriesysteme und Bewegungssensorik	19
2.4.1 Radimpulsgeber und Encoder.....	20
2.4.2 Encoder	22
2.4.3 Doppler-Radar	23
2.5 Geodätische Grundlagen	24
2.5.1 Erdfigur und Bezugssysteme	24
2.5.2 Geografische Koordinatensysteme	26
2.5.3 Höhendefinition	27
2.5.4 Geodätische Abbildungen	27
2.5.5 Lokale kartesische Koordinatensysteme	27

2.5.6	Koordinatensysteme entlang von Verkehrswegen (Kilometrierung).....	29
2.6	Satellitennavigation	30
2.6.1	Technischer Aufbau von Satellitennavigationssystemen.....	30
2.6.2	Satellitenbahnen und Bahnelemente	32
2.6.3	Zeitdefinitionen	33
2.6.4	Auswertung der Satellitensignale im Empfänger.....	34
3	Stand der Forschung im Bahnbereich	37
3.1	Simulationen im Bahnbereich	37
3.1.1	Schienenverkehr-Infrastruktur-Simulationen.....	37
3.1.2	Test und Simulation von Schienenfahrzeugen	39
3.1.3	Simulation von ERTMS/ETCS	40
3.1.4	Simulations- und Testumgebungen für Satellitennavigation und deren Einsatz im Eisenbahnbereich	41
3.2	Erweiterte Odometrie und Satellitennavigation im Eisenbahnbereich	42
3.2.1	Einführung und Definition	42
3.2.2	Stand der Wissenschaft und Technik	43
3.2.3	Forschungsprojekt Galileo-above	46
3.2.4	Forschungsprojekt SiPoS-Rail	46
3.3	Eisenbahntestgebiete	47
3.3.1	Gleisanlagen des Institutes für Schienenfahrzeuge und Fördertechnik (IFS) der Universität RWTH Aachen.....	47
3.3.2	Siemens Prüf- und Validationcenter Wegberg-Wildenrath (PCW)	48
3.3.3	Galileo Testzentrum railGATE	48
3.3.4	Überführungsfahrten auf dem öffentlichen Gleisnetz.....	50
3.4	Eisenbahnversuchsfahrzeuge	50
3.4.1	Messstraßenbahn in Dresden.....	51
3.4.2	Zweiwegefahrzeug DLR RailDriVE	52
3.4.3	Vollbahn-Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“	53
4	Simulationsumgebung Basissoftware	55
4.1	Zielsetzung und Anforderungen an die Simulationsumgebung	56
4.2	Softwarearchitektur	59
4.3	Szenariosteuerung und Simulationsablauf	61
4.4	Streckenatlas-Server.....	62
4.5	Szenario-Live-Viewer	63
4.6	Systematik der Koordinatensysteme	64
4.7	Erzeugung von Szenariodaten, Strecken- und Fahrplandefinition.....	65
4.7.1	Streckenmodellierung.....	66

4.7.2	Allgemeiner Aufbau einer Primitive	68
4.7.3	Implementierung von Primitiven.....	68
4.7.4	Integration von Streckenstücken	69
4.7.5	Integration von konfigurierbaren Weichen	69
4.7.6	Streckendefinition mit mehreren Startelementen	70
4.7.7	Software zu Erstellung von Streckendefinitionen	70
4.7.8	Szenariodefinition aus Strecke und Fahrplan	72
4.7.9	Benutzeroberfläche Szenario-Viewer.....	72
5	Modellbeschreibung.....	73
5.1	Das Schienenfahrzeugmodell und das Simulink-Zentralmodell	74
5.2	Software-in-the-Loop-Architektur und Schnittstelle zum Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“.....	78
5.3	Software-Module zur Eisenbahninfrastruktur	79
5.4	ETCS-Fahrzeugausrüstung.....	80
5.4.1	ETCS-Fahrzeugsteuergerät (On-board Unit, ETCS-OBU).....	81
5.4.2	Schnittstelle zur ETCS-Streckenzentrale	82
5.4.3	ETCS-Anzeige- und -Eingabegerät (Driver Machine Interface, ETCS-DMI)	84
5.4.4	ETCS-Fahrzeugschnittstelle (Train Interface Unit, TIU).....	87
5.4.5	Schnittstelle zum ETCS-Eurobalisenempfänger (Balise Interface Unit, BIU).....	89
5.4.6	Odometrie-Modul	90
5.5	Triebfahrzeugführer -Modell.....	91
5.5.1	Bremskurve mit distanzabhängiger Geschwindigkeitsreduzierung	93
5.5.2	Bremskurve mit konstanter Beschleunigung.....	94
5.6	Zentralsteuergerät (ZSG).....	95
5.6.1	Minimalimplementierung	96
5.7	Fahrzeugtechnik – Struktur der Bewegungsmodelle.....	97
5.7.1	Implementierung des linearen 1D-Bewegungsmodells mit Beschleunigungsvorgabe	99
5.7.2	Schnittstelle zum dreidimensionalen Bewegungsmodell	100
5.8	Dreidimensionales Schienenfahrzeug- und Umgebungsmodell der Mehrkörpersimulation	102
5.8.1	Streckendefinition.....	102
5.8.2	Schienenfahrzeugmodelle.....	104
5.8.2.1	1-Körper-Modell	104
5.8.2.2	3-Körper-Modell	105

5.8.2.3	5-Körper-Modell	106
5.8.2.4	Gesamtfahrzeugmodell des IFS-Erprobungsträgers	107
5.9	Modellsystematik der Schienenfahrzeugsensorik	108
5.9.1	Sensor-Physikmodell	109
5.9.2	Physik-Störungsmodell	110
5.9.3	Physik-Fehlermodell	110
5.9.4	Sensor-Technikmodell	110
5.9.5	Technik-Störungsmodell	111
5.9.6	Technik-Fehlermodell	111
5.10	Eindimensionale Bewegungssensorik am Schienenfahrzeug	111
5.10.1	Radimpulsgeber	112
5.10.1.1	Sensor-Physikmodell	112
5.10.1.2	Physik-Störungsmodell	113
5.10.1.3	Physik-Fehlermodell	114
5.10.1.4	Sensor-Technikmodell	115
5.10.1.5	Technik-Störungsmodell	116
5.10.1.6	Technik-Fehlermodell	117
5.10.2	Doppler-Radar-Geschwindigkeitssensor	117
5.10.3	Correxit-Geschwindigkeitssensor	117
5.11	Umgebungsfeste 3D-Sensorik (Wegmarken)	118
5.11.1	ETCS-Eurobalisensimulator (Distanzbasierte Wegmarken)	118
5.11.2	Sensor-Physikmodell	118
5.11.2.1	Sensor-Technikmodell	120
5.11.3	RFID-Wegmarken-Sensorik (Wegmarke mit 3D-Position)	121
5.11.3.1	Sensor-Physikmodell	121
5.11.3.2	Physik-Störungsmodell	123
5.11.3.3	Physik-Fehlermodell	124
5.11.3.4	Sensor-Technikmodell	124
5.11.3.5	Technik-Störungsmodell	124
5.11.3.6	Technik-Fehlermodell	125
5.12	Fahrzeugfeste 3D-Sensorik	125
5.12.1	Satellitennavigation-Benutzersegment	125
5.12.1.1	Sensor-Physikmodell	126
5.12.1.2	Physik-Störungsmodell	126
5.12.1.3	Physik-Fehlermodell	127
5.12.1.4	Sensor-Technikmodell	127
5.12.1.5	Technik-Störungsmodell	127
5.12.1.6	Technik-Fehlermodell	127

5.12.2	Inertial Measurement Unit (IMU)	128
5.12.2.1	Sensor-Physikmodell	128
5.12.2.2	Physik-Störungsmodell	129
5.12.2.3	Physik-Fehlermodell	129
5.12.2.4	Sensor-Technikmodell	129
5.12.2.5	Technik-Störungsmodell	130
5.12.2.6	Technik-Fehlermodell	130
5.13	Satellitenavigation-Simulation	130
5.13.1	Berechnung der Satellitenposition	131
5.13.1.1	Zeitabweichung der Satellitenuhr	132
5.13.1.2	Zeitabweichung der Empfängeruhr	132
5.13.1.3	Berechnung der GNSS-Satellitenposition im ECEF-Koordinatensystem	133
5.13.2	Berechnung des wahren Abstandes (Truerange) des GNSS-Empfängers zu den GNSS-Satelliten (Sensor-Physikmodell)	136
5.13.2.1	Erddrehung während der Signallaufzeit (Sensor-Physikmodell)	136
5.13.2.2	Berechnung des wahren Abstandes (Truerange)	137
5.13.3	Störungseinflüsse der Pseudoabstandsmessung (Physik-Störungsmodell)	137
5.13.3.1	Distanz aus der Zeitabweichung der Satellitenuhr	137
5.13.3.2	Atmosphärische Störungen	138
5.13.3.3	Allgemeines Störungs- und Fehlermodell	138
5.13.4	Berechnung des Pseudoabstands (Physik-Störungsmodell)	139
5.13.5	Sensor-Technikmodell und Technik-Störungsmodell	140
5.13.6	Galileo-Testumgebung „railGATE“ in Wegberg-Wildenrath	140
5.13.7	Implementierungsstruktur	141
5.13.7.1	Positionsberechnung der GNSS-Satelliten	141
5.13.7.2	Abstandsberechnung zwischen GNSS-Empfänger und GNSS-Satelliten	143
5.14	Implementierte Streckendefinitionen	145
5.14.1	Anschlussgleise im Bahnhof Aachen-West der RWTH Aachen	145
5.14.2	Siemens Prüf- und Validationcenter in Wegberg-Wildenrath (PCW) ...	147
5.14.3	Generische Strecken	148
6	Validierung der Simulationsumgebung	149
6.1	Beschreibung der Testfahrt des IFS-Erprobungsträgers	149
6.2	Beschreibung des Simulationsszenarios	151
6.3	Situation an Wegmarke 7	153

6.4	Positionsabweichung über der gesamten Messfahrt	156
6.5	Positionsabweichungen an den Wegmarken	158
6.6	Bewertung der Validierungsergebnisse.....	159
7	Simulationsergebnisse.....	161
7.1	Analyse der Grundfunktionen der Simulationsumgebung	161
7.1.1	Exemplarische „Fahrt auf freier Strecke“	162
7.1.2	Eigenschaften der Ablaufsteuerung in MATLAB	163
7.1.3	Verlauf des Simulationsszenarios	167
7.1.4	Funktionalität des Streckenatlas-Servers	170
7.1.5	Funktionalität der Eisenbahninfrastrukturkomponenten und des ETCS	171
7.1.6	Analyse der Wiederholungsgenauigkeit.....	174
7.1.7	Performanceparameter der Simulationsumgebung	174
7.2	Analyse der Sensoriksimulation und des Sensor-Fehler-Moduls	175
7.2.1	Radimpulsgeber (Eindimensionale Bewegungssensorik).....	175
7.2.1.1	Sensor-Physikmodell und Physik-Störungsmodell.....	176
7.2.1.2	Sensor-Technikmodell und Technik-Störungsmodell	177
7.2.1.3	Technik-Fehlermodell.....	179
7.2.2	ETCS-Eurobalisen-Simulator (Distanzbasierte Wegmarken).....	181
7.2.3	RFID-Wegmarkensensorik (Wegmarken mit 3D-Position).....	182
7.2.4	Satellitennavigation-Benutzersegment (3D-Bewegungssensorik).....	185
7.2.5	Inertial Measurement Unit (IMU) (3D-Bewegungssensorik)	187
7.2.5.1	Sensor-Physikmodell	188
7.2.5.2	Physik-Störungsmodell	190
7.2.5.3	Sensor-Technikmodell	191
7.3	Analyse des Satellitennavigationsmodells	192
7.3.1	GNSS-Weltraumsegment (Sensor-Physikmodell)	192
7.3.2	GNSS-Benutzersegment (Sensor-Physikmodell).....	193
7.3.3	Erddrehung während der Signallaufzeit.....	195
7.3.4	GNSS-Benutzersegment-Störungsmodell.....	196
7.3.5	Vergleich der Pseudoabstandsmessung zwischen Simulationsumgebung und der Messung auf dem Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“	199
7.3.6	Galileo-railGATE-Pseudolitenumgebung.....	200
7.4	Bewertung der Simulationsergebnisse	202
7.4.1	Basissoftware.....	202
7.4.2	Sensoriksimulation	203
7.4.3	Satellitennavigation-Simulation	205

8	Zusammenfassung und Ausblick.....	207
8.1	Zusammenfassung und Diskussion	207
8.2	Ausblick.....	211
8.3	Weitere Vorschläge zur Anknüpfung an diese Arbeit.....	212
9	Verzeichnisse und Angaben.....	215
9.1	Literaturverzeichnisse.....	215
9.1.1	Literaturangaben.....	215
9.1.2	Veröffentlichungen des Autors.....	226
9.1.3	Verwendete studentische Arbeiten	228
9.1.4	Beteiligung an Veröffentlichungen ohne Autorenschaft.....	230
9.2	Symbolverzeichnisse	230
9.2.1	Abkürzungen und Eigennamen	230
9.2.2	Projektamen	241
9.2.3	Nomenklatur	243
9.2.4	Lateinische Buchstaben	244
9.2.5	Griechische Buchstaben und Symbole	248
9.2.6	Konstanten	250
9.2.7	Indizes.....	252
9.3	Abbildungsverzeichnis	253
9.4	Tabellenverzeichnis	260
9.5	Anmerkungen	260
Anhang.....	261
A	Vollbahn-Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“	262
A.1	Historie und Wissenschaftliche Nutzung	262
A.2	Das Grundfahrzeug.....	264
A.3	Der Leitstand und die Fahrzeugsteuerung im Bürocontainer.....	264
A.3.1	Fahrerpult-Schnittstelle	266
A.3.2	MVB-Schnittstelle zwischen RCP-System und Zentralsteuergerät	268
A.4	Sensorik	268
A.5	Referenzsensorik für Geschwindigkeit und Distanz	269
A.5.1	Mitlaufendes Rad (Peiseler-Schlepprad).....	269
A.5.2	CORRSYS 3D CORREVIT RAIL 200.....	270
A.5.3	Radimpulsgeber	271
A.5.4	Doppler-Radar Deuta DRS05.....	271
A.6	Inertialsensor (Inertial Measurement Unit, IMU)	272
A.7	Wegmarken-Positionssensorik	272
A.7.1	UHF-RFID Transponder-Empfänger-System	273

A.7.2	Induktiver Wegmarkensensor	274
A.7.3	Laser-Abstandssensor.....	275
A.7.4	Integrierte Wegmarke.....	275
A.7.5	Erkennung und Vermessung der integrierten Wegmarke	277
A.8	GNSS-Positionssensorik	278
A.8.1	GNSS-Einfrequenz-Empfänger (GNSS-FR1, GNSS-FR2).....	278
A.8.2	Zweifrequenz-Empfänger (GNSS-4)	279
A.8.3	GNSS-Referenz-Empfänger (GNSS-3).....	279
A.8.4	railGATE-Benutzersegment (GNSS-5).....	280
A.9	Allgemeine Parameter des Versuchsfahrzeuges „IFS-Erprobungsträger 1“	280
A.9.1	Gesamtfahrzeug und Wagenkasten	281
A.9.2	Drehgestellrahmen	281
A.9.3	Radsätze.....	282
A.9.4	Federstufen	283
A.9.5	Bürocontainer	283
A.10	Koordinatensysteme des Versuchsfahrzeuges	284
A.10.1	Wagenkasten-Koordinatensystem (KS-WK)	285
A.10.2	Wiegenträger-Koordinatensysteme (KS-WT1 / KS-WT2).....	287
A.10.3	Drehgestell-Koordinatensysteme (KS-DG1 / KS-DG2).....	288
A.10.4	Koordinatensystem-Beziehung zum Fahrweg	290
A.10.5	Vollständiges geometrisches Modell mit Radsatz-Koordinatensystem	290
A.10.6	Vereinfachtes geometrisches Modell ohne Radsatz.....	291
A.11	Definition der Sensorpositionen.....	291
A.11.1	GNSS-Antennenpositionen	291
A.11.2	Inertialsensor / IMU	295
A.11.3	Inertialsensor / IMU im Drehgestellrahmen des Drehgestells DG1	295
A.11.4	2D-Beschleunigung auf dem Wagenkasten über dem Drehgestell DG1	296
A.11.5	RFID-Sensorik	297
A.11.6	Vertikaler Abstandslaser	298
A.11.7	Induktiver Abstandssensor	298
A.11.8	Doppler-Radar in beide Fahrtrichtungen	299
A.11.9	Geschwindigkeitssensor CorrRail Correvit Rail 200	300
A.11.10	Geschwindigkeitssensoren: Mitlaufende Räder	301
A.11.11	Drehgestell-Ausdrehwinkel.....	301
A.11.12	Sekundärfederweg.....	303

B	Details der Konfiguration zu den Ergebniskapiteln Kapitel 6 und Kapitel 7	305
B.1	Simulationscomputer	305
B.2	Fahrplandefinition zur Referenzmessfahrt vom 31.10.2014	305
B.3	Ausschnitt aus der railML-Datei zur Streckendefinition	307
B.4	SIMPACT-Streckendefinition	309
B.5	Wegmarken auf dem PCW Testring T1	309
B.6	Pseudolitenpositionen des railGATE	310
B.7	Szenariodaten aus Abschnitt 7.1.1 – Fahrplandefinition im railML-Format	311
B.8	Broadcast-Ephemeriden der GPS-Satelliten aus Abschnitt 7.3.....	313
B.9	Final Orbit Combination der GPS-Satelliten.....	318
B.10	Finale Ephemeriden der GPS-Satelliten	319
B.11	GPS-Satelliten-Informationen	320
C	Ergänzungen und Details zu den Simulationsergebnissen in Abschnitt 7.3.....	321
C.1	Abweichung der Satellitenpositionen.....	322
C.2	Änderung der Satellitenposition während der Signallaufzeit.....	323
C.3	Einfluss der Uhrenabweichung von GPS-Satelliten.....	324
C.4	Gauß-Newton-Verfahren (Ausgleichsrechnung) zur GNSS-Positionsschätzung.....	326
C.4.1	Einleitung und Anwendung der Sensorfusion.....	326
C.4.2	Validierung des GNSS-Modells der Simulationsumgebung.....	327
C.4.3	Algorithmus der GNSS-Positionsschätzung	328
D	Ergänzende Kapitel zur Simulationsumgebung	332
D.1	Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA)	332
D.2	Koordinatentransformationen zwischen Koordinatensystemen	334
D.2.1	Richtungskosinusmatrizen für ebene Drehungen.....	334
D.2.2	Transformation ECEF→LLA	334
D.2.3	Transformation ECEF→KS-Kugel	336
D.2.4	Transformation ECEF→NED	337
D.2.5	Transformation ECEF→KS-MKS	338
D.2.6	Transformation KS-MKS→KS-<Marker>	340
D.2.7	Transformation ECEF→KS-PCW	341
D.2.8	Transformation ECEF→KS-IFS	341
D.2.9	Sphärisches Koordinatensystem in der Ebene (Skyplot)	342

Kurzfassung

Bei der Entwicklung von großen Investitionsgütern mit geringen Stückzahlen sind Praxistests mit einem hohen Aufwand verbunden. Im Eisenbahnbereich sind Testfahrten besonders zeit- und kostenintensiv und stellen hohe technische, rechtliche und organisatorische Anforderungen. Mit Simulations- und Co-Simulationstechniken können die Analysemöglichkeiten gegenüber Versuchsfahrten erweitert und der Umfang aufwendiger realer Tests verringert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Simulationsumgebung beschrieben und validiert, in der ein Schienenfahrzeugmodell und ein Eisenbahninfrastrukturmodell mit einem raum- und zeitabsoluten Umgebungsmodell gekoppelt sind. In einem ersten Anwendungsfall wird die Simulationsumgebung als Software-in-the-Loop-Entwicklungsumgebung zur Erforschung von neuer Schienenfahrzeug-Bewegungsmesstechnik (Odometriesysteme) mit Satellitennavigation, elektronischen Wegmarken und Inertialsensorik verwendet.

Die Simulationsumgebung hat eine Co-Simulationsarchitektur, in der eine objekt- und ereignisbasierte Infrastruktursimulation, eine signalbasierte Schienenfahrzeug- und Umgebungssimulation sowie eine Mehrkörpersimulation aus verschiedenen Simulationsprogrammen gekoppelt sind. Eine konfigurierbare Szenariosteuerung automatisiert den Simulationsablauf. Aus einer Gleisnetzdefinition und einem Fahrplan wird die zu fahrende Strecke ermittelt, die programmspezifische Streckendefinitionen erzeugt und alle Modelle konfiguriert. Die aktiven Infrastruktursysteme Leitstelle und Stellwerk werden als Grundstruktur angelegt und eine signalgeführte Zugfahrt des simulierten Schienenfahrzeuges durchgeführt. Als Zugleit- und Sicherungssystem wird ERTMS/ETCS verwendet. Das Simulink-Zentralmodell enthält die signalbasierten Modelle: ETCS-Fahrzeugausrüstung, Fahrermodell, Fahrzeugtechnik, Zentralsteuergerät, eindimensionales Bewegungsmodell, Sensormodelle und das Satellitennavigationsmodell. Die Informationsverarbeitung und Kommunikation von Steuergeräten ist modelliert. Das Mehrkörpersimulationsprogramm SIMPACK simuliert die dreidimensionale Bewegung des Schienenfahrzeuges. In Sensormodellen werden physikalische und technische Sensorsignale in einander aufbauenden Teilmodellen ideal, gestört und fehlerbehaftet erzeugt.

Als Werkzeug zur Entwicklung GNSS-erweiterter Odometrie-Anwendungen werden folgende Sensormodelle mit absolutem Raumbezug vorgestellt: Wegmarken mit einer festen Kilometrierung oder einer Geoposition, Inertialsensorik und die funktionale Implementierung eines GNSS-Empfängermodells zur kontinuierlichen Positions- und Bewegungsmessung. In einem weiteren Satellitennavigationsmodell werden die funktionalen Rohdaten aus wahren und Pseudo-Abständen zwischen GNSS-Satellit und GNSS-Empfänger simuliert. Die Galileo-Satellitennavigation-Testumgebung „railGATE“ ist als ein Spezialfall eines GNSS-Weltraumsegmentes implementiert.

Alle Positionen werden systematisch auf das erdfeste Referenzkoordinatensystem ECEF des WGS84-Datums bezogen. Als Zeitbezug wird die koordinierte Weltzeit UTC verwendet. Das Vollbahn-Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ der Universität RWTH Aachen ist als Referenzfahrzeug nachgebildet. Anhand realer Messdaten aus Versuchsfahrten werden die Simulationsergebnisse validiert.

In dieser kombinierten Simulation aus Schienenfahrzeug, Eisenbahninfrastruktur und Umgebung werden eine Programm- und Modellstruktur angelegt, in der alle grundlegenden Systembestandteile des Eisenbahnverkehrs vorhanden sind. Je nach Aufgabenstellung lassen sich die Modelle mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad und Implementierung verwenden. Dadurch entsteht eine universelle Systemstruktur, in die viele Eisenbahnanwendungen integrierbar sind.

Abstract

In the development of large equipment with low production quantity, real-world tests necessitate high amounts of effort. In the railway sector, such tests are especially time-consuming and costly and have high technical, legal and organisational demands. To mitigate these challenges, simulation and co-simulation techniques can be used to extend the range of analysis and to reduce complex real-world tests.

This dissertation describes and validates a simulation environment in which a railway vehicle model and a railway infrastructure model are coupled with an environment model in absolute space and time. A model structure is created containing all fundamental system components of rail transport. System component models with different levels of detail and different implementations can be used depending on the task and application. This creates a universal system structure into which many railway applications could be integrated. In an initial application, the simulation environment is used as a software-in-the-loop development environment for the research of new railway vehicle motion measurement systems (odometry systems) with satellite navigation, electronic landmarks and inertial sensors. As a method for coupled railway and environment simulation, the basic feasibility, operational capability and flexibility of the software and the model structure are presented. Furthermore, advantageous structures are identified.

The simulation environment has a co-simulation architecture in which object- and event-based infrastructure simulation, signal-based rail vehicle and environment simulation as well as multi-body simulation are combined from different simulation programs. A configurable scenario control automates the simulation process. Starting from a railway network definition and a train schedule, the routes to be traveled are determined, the program-specific route definitions are generated and all models are automatically configured. The active infrastructure systems, namely the control center and interlocking, are designed as a basic structure and a signal-guided journey of the simulated rail vehicle is carried out. ERTMS/ETCS is used as the train control and train protection system. The central model is developed in Simulink and contains the signal-based models: ETCS vehicle equipment, driver model, vehicle technology, central control unit, one-dimensional motion model, sensor models and the satellite navigation model. The information processing and communication of control devices is modeled. The multi-body simulation program SIMPACK simulates the three-dimensional movement of the railway vehicle. In sensor models, physical and

technical sensor signals are generated using sequential submodels in ideal, disturbed, and defective forms.

As tools for the development of GNSS-enhanced odometry applications, the following sensor models with absolute spatial reference are presented: electronic landmarks with rail position or geodetic position, inertial sensors, and the functional implementation of satellite navigation (GNSS) receiver model for continuous position and motion measurement. In a second satellite navigation model, the functional raw data are simulated as true-range and pseudo-range virtual measurements between the GNSS space segment (the satellites) and the GNSS user segment (the receiver). The Galileo satellite navigation testbed "railGATE" is implemented as a special case of a GNSS space segment.

All positions are systematically referenced to the earth fixed reference coordinate system ECEF of the WGS84 datum. The coordinated universal time UTC is used as a time reference. The railway test vehicle "IFS-Erprobungsträger 1" of the RWTH Aachen University is simulated as a reference vehicle. The simulation results are validated on real measurement data from test drives.

1 Einleitung und Motivation

Innovationen im Eisenbahnbereich stehen immer vor der Herausforderung, dass der hohe Entwicklungs- und Testaufwand durch eine geringe Stückzahl von großen und somit teuren Investitionsgütern erbracht werden muss. Testfahrten sind bei schienen- gebundenen Verkehrsmitteln besonders zeit- und kostenintensiv und stellen hohe technische, rechtliche und organisatorische Anforderungen. Schienenfahrzeuge sind sehr große und teure Fahrzeuge, die ein hohes technisches Know-how und einen großen Wartungsaufwand erfordern. Die Instrumentierung von Messtechnik ist nur eingeschränkt möglich, muss besonders robust ausgeführt sein und von verschiedenen Institutionen zugelassen oder genehmigt werden. Bei Fahrten auf öffentlichen Eisenbahnstrecken ist man auf freie Streckenkapazitäten angewiesen, die Testzeit ist begrenzt, und es wird ein ausgebildeter Triebfahrzeugführer benötigt.

In speziellen Eisenbahntestzentren lassen sich viele der Einschränkungen vereinfachen oder überwinden. Die prinzipiellen Nachteile von Messungen können mit Versuchsfahrzeugen verringert werden. Bei allen Messungen beeinflussen Störungen die Messsignale, und nur Teile des Systems können in einer begrenzten Anzahl von Situationen beobachtet werden. Es bleibt jedoch unbestritten, dass reale Fahrversuche ein wichtiges und notwendiges Mittel zur Vermessung von technischen Eigenschaften und zum Funktionsnachweis sind.

Mit der gestiegenen Leistungsfähigkeit von Computern und Simulationsprogrammen wird, als ein technologischer Trend, ein Teil der teuren und aufwendigen Versuche in Simulationen verlagert. Simulations- und Co-Simulationstechniken können die Analysemöglichkeiten gegenüber Versuchsfahrten erweitern und den Umfang aufwendiger realer Tests verringern. Neben einer Reduktion des Aufwandes bietet dies den Vorteil, dass die Bedingungen, denen ein modelliertes System ausgesetzt wird, vollständig bekannt und reproduzierbar sind. Die Simulationsmodelle und damit auch die Modellvorstellung sowie die gewählten Parameter werden anhand von Referenzmessdaten validiert. In virtuellen Testfahrten werden dann Versuchsbewegungen durchgeführt und anhand der virtuell erzeugten Messdaten die zu testenden Algorithmen oder Systeme untersucht.

Im Rahmen der Weiterentwicklung von modernen kommunikationsbasierten Zugleit- und Sicherungssystemen (wie dem europäischen ERTMS/ETCS-System) und deren zunehmenden Funktionsumfang und Automatisierung steigen die

Anforderungen an die sichere und hochverfügbare Bewegungsmessung (Odometrie) auf einem Schienenfahrzeug. Von der Einführung neuer Sensoren für Odometrie-systeme, wie der Satellitennavigation, ist neben einer Funktionserweiterung ein verringerter technischer Aufwand zu erwarten. Mit dem Aufbau des europäischen Satellitennavigationssystems Galileo und der Weiterentwicklung des europäischen ERTMS/ETCS-Systems wird die Kombination dieser Systeme in mehreren großen Forschungs- und Entwicklungsprojekten intensiv untersucht.

In den Forschungsprojekten Galileo-above und SiPoS-Rail wurden die Nutzung von Satellitennavigation für Automatisierungsaufgaben auf einem Schienenfahrzeug (z.B. automatisierte Rangierbewegungen mit einem Rangierer-Assistenzsystem) untersucht und Testfahrten in einem Eisenbahntestzentrum durchgeführt. Für die Aufnahme von Referenzmessdaten, Komponententests und Gesamtfahrzeugtests besitzt das Institut für Schienenfahrzeuge und Fördertechnik der Universität RWTH Aachen das Vollbahn-Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“. Dieses Schienenfahrzeug ist eine universelle Versuchsplattform für mobile Anwendungen und verfügt über eine vollständige Prüfstandsausstattung mit Rapid-Control-Prototyping Zentral- und Bremssteuergeräten, Referenzmesstechnik und einer automatisierten Messdatenauswertung.

Im Ergebnis dieser Versuche zeigt sich die Satellitennavigation als ein viel komplexerer Sensor als konventionelle Sensoren. Das Messprinzip ist aufwendiger, und die integrierte Messelektronik erzeugt an den digitalen Schnittstellen eine Vielzahl unterschiedlicher Messsignale. Die Rohdaten und die daraus berechneten Positions- und Geschwindigkeitssignale weisen große (im Meterbereich) und nicht vollständig mess- und korrigierbare Störeinflüsse auf. Eine dreidimensionale Referenzmesstechnik mit absoluten Genauigkeiten im einstelligen Zentimeterbereich ist sehr aufwendig.

Bei der Erforschung von neuer Bewegungsmesstechnik im Eisenbahnbereich ergibt sich die Notwendigkeit, die vorhandenen und die neuen Sensorsysteme in realen Experimentaufbauten und in Simulationsumgebungen zu untersuchen. Die Schwierigkeit besteht in der Integration der unterschiedlichen Sensorsignale. Konventionelle Bewegungsmesstechnik auf einem Schienenfahrzeug misst eine eindimensionale Distanz und Geschwindigkeit entlang der Gleismittellinie. Die Besonderheit der Satellitennavigation besteht in der Messung einer dreidimensionalen Position mit einem dreidimensionalen Geschwindigkeitsvektor. Da sich die Antenne auf dem Dach des Schienenfahrzeuges befindet, wird selbst die ideale Position der Antenne mehrere Meter vom Trassenverlauf entfernt sein. Durch den Aufbau des Schienenfahrzeuges mit zwei Drehgestellen (und vier Radsätzen) als Kontaktpunkte zum Fahrweg ergeben sich komplexe geometrische Verhältnisse. Dies wirkt sich bei Fahrweganregungen und besonders im Bogen oder in Klothoiden mit Überhöhung aus.

1.1 Ziel der Arbeit

Um die beschriebenen Schwierigkeiten bei der Nutzung von Satellitennavigation für Schienenfahrzeuge zu überwinden, soll neben dem Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ eine Simulationsumgebung entwickelt werden, in der sich die Bereiche Schienenfahrzeug und absolute Positionsmessung untersuchen lassen. Zur systematischen Integration von Zugleit- und Sicherungssystemen werden die Eisenbahninfrastruktursysteme funktional in die Simulationsumgebung mit aufgenommen.

In der vorliegenden Arbeit wird der Aufbau einer Simulationsumgebung beschrieben sowie validiert, in der ein Schienenfahrzeugmodell und ein Eisenbahninfrastrukturmodell mit einem raum- und zeitabsoluten Umgebungsmodell gekoppelt sind. Für einen ersten Anwendungsfall wird die Simulationsumgebung als eine Software-in-the-Loop- (SiL-) Entwicklungsumgebung zur Erforschung von neuer Schienenfahrzeug-Bewegungsmesstechnik (Odometriesystemen) mit Satellitennavigation, elektronischen Wegmarken und Inertialsensorik erstellt.

Das wissenschaftliche Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und Untersuchung der Methode einer kombinierten Eisenbahn- und Umgebungssimulation. In einer konsistenten Softwareumgebung werden ein Schienenfahrzeugmodell und ein grundlegendes Eisenbahninfrastrukturmodell in Verbindung mit einem räumlichen Umgebungsmodell simuliert. Das Umgebungsmodell wird durch ein Satellitennavigationsmodell und durch Sensormodelle mit absolutem Raum- und Zeitbezug erweitert.

Die grundsätzliche Machbarkeit, Einsatzfähigkeit und Flexibilität der Software- und Modellstruktur werden nachgewiesen und es werden vorteilhafte Strukturen identifiziert.

Die Simulationsumgebung weist eine Co-Simulationsarchitektur auf, in der eine Infrastruktursimulation, eine signalbasierte Schienenfahrzeug- und Umgebungssimulation sowie eine Mehrkörpersimulation aus verschiedenen Simulationsprogrammen miteinander gekoppelt sind.

Als Referenzfahrzeug wird das Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ in der Simulationsumgebung nachgebildet. Anhand realer Messdaten aus Versuchsfahrten werden die Simulationsergebnisse validiert.

Das Schienenfahrzeug wird als ein mechatronisches System modelliert, bei dem die mechanischen Eigenschaften, aber besonders die elektronischen und informationstechnischen Eigenschaften der Schienenfahrzeugtechnik (funktional) modelliert sind.

1.2 Gliederung der Arbeit

Im zweiten Kapitel werden zunächst die technischen Grundlagen zu den in dieser Arbeit verwendeten Themengebieten vorgestellt: Eisenbahninfrastruktur, Schienenfahrzeuge, konventionelle Bewegungsmesstechnik und Ortung mit Satellitennavigation.

Kapitel 3 enthält eine Analyse des Standes der Wissenschaft und Technik zu Simulations- und Versuchstechnik im Eisenbahnbereich. Es fasst den Forschungsstand zu den Themengebieten Eisenbahninfrastruktursimulation, Schienenfahrzeugsimulation, Satellitennavigationssysteme im Bahnbereich zusammen und stellt für die Forschung nutzbare Eisenbahntestgebiete und Versuchsfahrzeuge vor.

Im vierten Kapitel werden die Anforderungen und Randbedingungen, die an eine Simulationsumgebung gestellt werden, diskutiert. Anschließend wird die grundlegende Softwarearchitektur mit der modellunabhängigen Basissoftware des Programmsystems beschrieben.

Alle Modellbeschreibungen der Eisenbahninfrastruktur, des Schienenfahrzeuges und der Umgebung werden im fünften Kapitel zusammengefasst und die Teilmodelle entlang des Signalflusses vorgestellt.

Im sechsten Kapitel wird die Simulationsumgebung anhand von Messdaten des Versuchsfahrzeuges „IFS-Erprobungsträger 1“ validiert. Die Eigenschaften des Simulationsszenarios werden vorgestellt. Es folgen eine Beschreibung der sich daraus ergebenden komplexen Situation sowie eine Genauigkeitsanalyse der Simulationsumgebung.

Das siebte Kapitel stellt die Funktionalität der Simulationsumgebung anhand einer exemplarischen „Fahrt auf freier Strecke“ als ein zweites Simulationsszenario vor. Die Simulationsergebnisse der Basissoftware sowie der Infrastruktur-, Fahrzeugtechnik- und Sensorikmodelle werden entlang des Signalflusses analysiert.

Im achten Kapitel werden die Ergebnisse zusammengefasst und abschließend eingeordnet. Mögliche Erweiterungen und Verbesserungen werden in einem Ausblick formuliert.

Im ersten Teil des Anhangs wird das Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ ausführlich vorgestellt. Es folgt eine Dokumentation der Konfiguration und weiterer Details zu den in Kapitel 6 und Kapitel 7 vorgestellten Simulationsszenarien.

2 Grundlagen und Stand der Technik

Die in dieser Arbeit beschriebene Simulationsumgebung besteht aus sehr unterschiedlichen Technikbereichen der Eisenbahn und weiteren Technologien wie der Satellitennavigation. In diesem Kapitel werden, beginnend mit dem Eisenbahnbereich aus Eisenbahninfrastruktur und Schienenfahrzeug, die grundlegenden Themen eingeführt.

Abschnitt 2.1 stellt die technischen Grundstrukturen der Eisenbahninfrastruktur vor. Das in der Simulationsumgebung genutzte Zugleit- und Zugsicherungssystem ERTMS/ETCS wird in Abschnitt 2.2 beschrieben.

Anschließend fasst Abschnitt 2.3 den grundlegenden Aufbau eines Schienenfahrzeuges mit seinen mechanischen Strukturen, den Fahrzeugtechnikkomponenten und der Fahrzeugsteuerung zusammen. Im vierten und fünften Kapitel wird darauf aufbauend das Schienenfahrzeugmodell abgeleitet. Die konventionelle Bewegungsmesstechnik (Abschnitt 2.4) auf einem Schienenfahrzeug wird für die Modellierung von Sensormodellen in Kapitel 5 genutzt.

Die Besonderheit der Simulationsumgebung besteht in der raumbezogenen Beschreibung der Fahrzeugbewegung. Hierfür werden die aus dem Bauingenieurwesen stammenden Methoden der Landesvermessung (Geodäsie) in Abschnitt 2.5 vorgestellt und die standardisierten Koordinatensysteme und Konventionen beschrieben.

Abschnitt 2.6 erläutert das Grundprinzip und die technische Umsetzung von Satellitennavigationssystemen.

2.1 Eisenbahninfrastruktur

Schienenfahrzeuge als spurgebundene Verkehrsträger sind mit ihrem Fahrweg auf ein Gleis festgelegt. Der Fahrweg kann sich an Weichen verzweigen oder einmünden und an Kreuzungen überschneiden. Ein Wechsel des Fahrweges außerhalb dieser Punkte ist nicht möglich [1].

Im Gegensatz zum Automobilverkehr wird der Schienenverkehr streng signalbasiert durchgeführt. Dies bedeutet, dass eine Zugfahrt immer durch ein Signal von einer streckenseitigen Infrastruktur erlaubt werden muss. Dies macht einen umfangreichen organisatorischen und technischen Aufwand notwendig. In den vergangenen 150 Jahren hat sich eine ausgereifte Leit- und Stellwerkstechnik entwickelt, die in

verschiedenen Ländern, über mehrere Technikgenerationen und Hersteller hinweg, sehr unterschiedlich ausgeprägt ist [2]. Im deutschsprachigen Eisenbahnumfeld hat sich der Begriff „Leit- und Sicherungstechnik“ durchgesetzt. Hierbei umfasst die Leittechnik die dispositiven Aufgaben ohne Sicherheitsrelevanz. Die Sicherungstechnik fasst die Signaltechnik zur Fahrwegsicherung und Zugbeeinflussung zusammen. Das Stellen und Sichern des Fahrweges wird durch das Stellwerk umgesetzt.

Grundsätzlich unterscheidet man bei schienengebundenen Verkehrsträgern zwischen Metrosystemen (U-Bahn, S-Bahn, Straßenbahn), Nebenbahnen (Industrie- und Hafenbahnen) sowie Vollbahnen im regulären Zugverkehr. Die Infrastruktur von Vollbahnen im deutschsprachigen Raum lässt sich grundlegend folgendermaßen strukturieren (siehe Abb. 1).

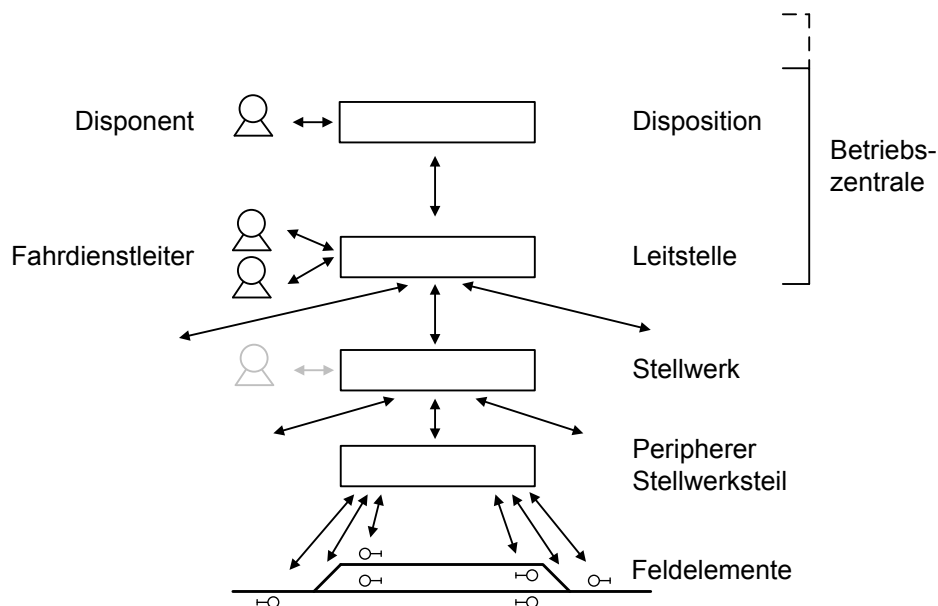


Abb. 1: Funktionale Eisenbahninfrastruktur [1, 2, 3]

An den Gleisen befinden sich sogenannte Feldelemente. Dies können Weichenantriebe sein oder Signale und Achszähler, die von einem peripheren Stellwerksteil aus bedient oder ausgelesen werden.

Das mit dem peripheren Stellwerksteil verbundene Stellwerk stellt und sichert den Fahrweg als Fahrstraßen, die für eine Zugfahrt reserviert sind. (Es sind andere Verfahren möglich.) Hierzu gehört das Erzeugen eines durchgängigen Fahrweges durch das Legen der Weichen. Durch das Stellen der Signale wird eine gelegte und gesicherte Fahrstraße für eine Zugfahrt freigegeben. Das Stellwerk überwacht die Gleisbelegung während einer Zugfahrt z. B. durch Achszähler oder Gleisstromkreise.

Moderne Stellwerke werden von einer Betriebszentrale aus bedient. Darin werden die Stellwerke einer Region über Netzwerke an die Betriebszentrale angeschlossen. Der reguläre Zugverkehr wird hier von Bedienplätzen aus, zentral gesteuert und überwacht.

An die Betriebszentrale sind weitere Systeme angeschlossen. So lassen sich z.B. Bedienhandlungen durch automatisierte Fahrstraßenstellung (Zuglenkanlage [1]) nach dem Fahrplan automatisieren. Bei Störungen können Dispatcher den Zugverkehr übergeordnet lenken. Eine detaillierte Beschreibung der technischen Installationen und Funktionalitäten aktueller Elektronischer Stellwerke (ESTW) findet man in [4].

Die Schnittstelle zwischen der Eisenbahninfrastruktur und einem Schienenfahrzeug oder Zug besteht mechanisch aus dem Rad-Schiene-Kontakt und dem Pantograph-Oberleitungskontakt. Informationstechnisch existiert eine Verbindung durch das Signalsystem und die Zugsicherung. Zusätzlich wird Sprech- und Datenfunk eingesetzt.

Als ein Leitsystem übertragen Signalsysteme die Fahrtfreigaben und die Bedingungen der Fahrt an das Schienenfahrzeug. Die hierfür nutzbaren Technologien haben sich von mechanischen Signalanlagen (Semaphore) über Lichtsignalanlagen zu funkbasierten, integrierten Leit- und Sicherungssystemen mit kontinuierlicher Datenübertragung weiterentwickelt. Zur Durchsetzung der Fahrbefehle eines Signal- oder modernen Leitsystems gibt es auf jedem Schienenfahrzeug und auf jedem (Haupt-)Gleis ein Zugsicherungssystem.

Die Zugsicherung besteht aus infrastrukturseitigen und fahrzeugseitigen Einrichtungen. Wichtigste Aufgabe ist die Geschwindigkeitsüberwachung des Fahrzeuges. So wird die zugelassene Höchstgeschwindigkeit überwacht und der Geschwindigkeitsverlauf vor einer Geschwindigkeitsreduzierung oder einem Halt durch sogenannte Bremskurven vorgegeben. Man kann grundsätzlich zwischen einer punktförmigen und einer permanenten Überwachung des Zuges unterscheiden. Punktförmige Überwachung findet meist vor Signalen statt, um das unbeabsichtigte Überfahren oder das nicht rechtzeitige Bremsen vor einem Halt zeigenden Signal zu verhindern. Systeme, die eine permanente Datenverbindung zwischen Infrastruktur und Zug halten, können kontinuierlich Fahrtfreigaben und Stellbefehle an den Zug senden. Für die Datenverbindung nutzt man einen im Gleis verlegten Schlitzleiter (LZB – Linienförmige Zugbeeinflussung) oder, in modernen Systemen, verschiedene Formen von Mobilfunk. Für den Vollbahnbereich haben sich in Europa viele verschiedene Zugleit- und Zugsicherungssysteme herausgebildet. In Deutschland wird als punktförmige Zugbeeinflussung das induktiv wirkende PZB90-System (Indusi) verwendet. Als System zur permanenten Überwachung des Zuges wird das LZB-System eingesetzt.

Zur Harmonisierung der europäischen Zugsicherungssysteme soll das Europäische Eisenbahnverkehrsleitsystem ERTMS (European Rail Traffic Management System) mit dem darin enthaltenen Europäischen Zugsicherungssystem ETCS (European Train Control System) die vorhandenen europäischen Zugsicherungssysteme langfristig ablösen.

Außerhalb des Vollbahnbereiches werden kommunikationsbasierte Zugleit- und Sicherungssysteme unter der Bezeichnung CBTC (Communication Based Train Control) zusammengefasst.

2.2 Zugleit- und Zugsicherungstechnik mit ERTMS/ETCS

Viele Personen- und Güterzugverbindungen führen durch mehr als ein europäisches Land. Bei solchen Verbindungen muss der Zug oder mindestens die Lokomotive über die in diesen Ländern vorhandenen Leit- und Sicherungssysteme verfügen. Hierfür wurden Mehrsystemlokomotiven/-züge entwickelt, oder am Grenzbahnhof wird die Lokomotive gewechselt. Um dies für die wichtigen Verkehrsstrassen (Transeuropäische Netze, TEN) zu vereinfachen, wird seit den frühen 1990er Jahren ein neues Zugleit- und Sicherungssystem für Europa namens ERTMS/ETCS entwickelt. Die funktionale Spezifikation wird von der Europäischen Eisenbahnagentur (ERA) als Institution der Europäischen Kommission herausgegeben. Die regionalen und nationalen Zugleit- und Sicherungssysteme, z.B. PZB90, werden jedoch als sogenannte Class-B-Systeme parallel zu ETCS Bestand haben.

Es gibt zwei anwendbare Hauptversionen des ETCS, Baseline 2 [5] und Baseline 3 [6]. Die zahlreiche Unterversionen werden nach der entsprechenden Hauptversion mit 2.x.x oder 3.x.x bezeichnet. Die Kompatibilität der ETCS-Fahrzeugausrüstung mit der streckenseitig verbauten ETCS-Ausrüstung ist nachzuweisen. Die Spezifikationen für die einzelnen Teilsysteme und Bereiche des ETCS werden in sogenannten SUBSET's von der Europäische Eisenbahnagentur ERA herausgegeben.

Abb. 2 zeigt die Systemübersicht der Hauptkomponenten des ETCS mit deren (spezifizierten) funktionalen Zusammenhängen. Darin sind die grundlegenden Funktionalitäten der fahrzeugseitigen und infrastrukturseitigen ETCS-Komponenten und deren Schnittstellen mit Schnittstellenspezifikation angegeben. Die fahrzeugseitigen Funktionalitäten („ETCS On-board“) werden in der ETCS-Fahrzeugausrüstung umgesetzt. Die infrastrukturseitigen Komponenten (ETCS Trackside) bestehen aus an der Strecke verteilten Komponenten (ETCS-Eurobalise, ETCS-Euroloop) und einer ETCS-Streckenzentrale (Radio Block Center, RBC). Die Komponenten werden im Folgenden vorgestellt.

An das Stellwerk und die Betriebszentrale ist eine ETCS-Streckenzentrale (Radio Block Centre, RBC) angeschlossen (Abb. 3). Über ein an der Fahrstrecke installiertes GSM-R-Mobilfunksystem kommuniziert die ETCS-Streckenzentrale über eine permanente Datenverbindung mit der verbauten ETCS-Fahrzeugausrüstung. Auf der Fahrstrecke sind elektronische Wegmarken verbaut, sogenannte ETCS-Eurobalisen, die von dem darüber fahrenden Schienenfahrzeug ausgelesen werden.

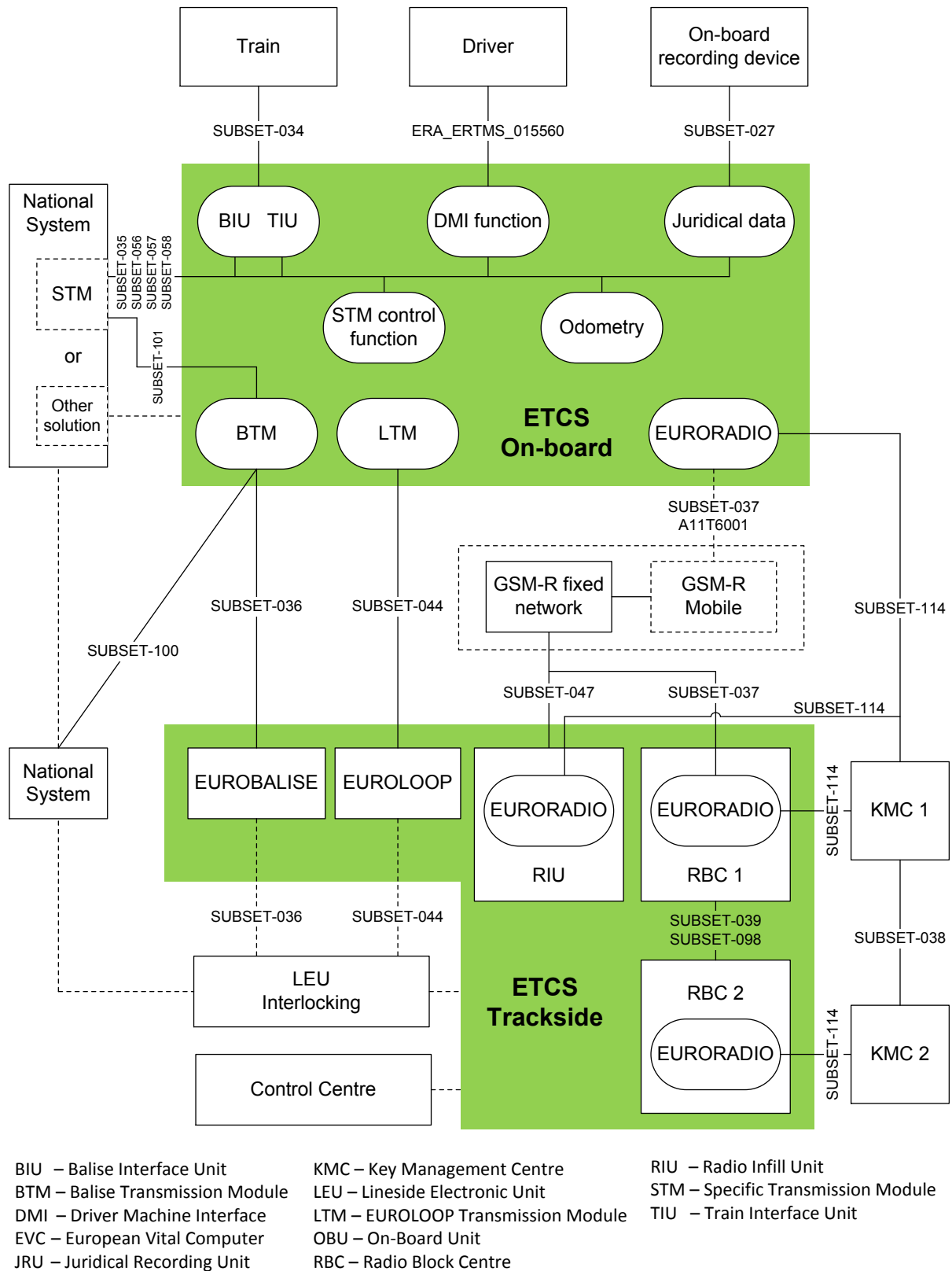


Abb. 2: ETCS-Systemübersicht mit Schnittstellenspezifikation aus SUBSET-026-2 [6]

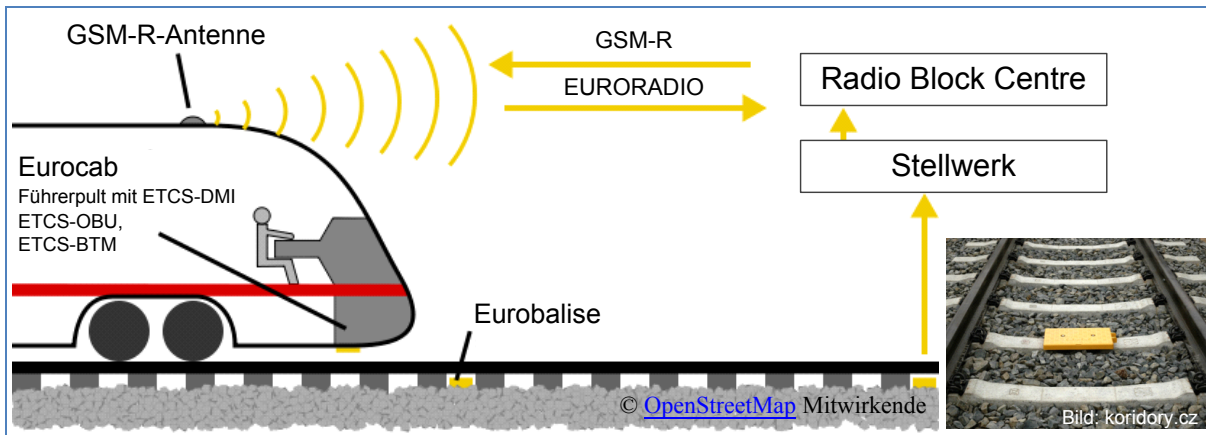


Abb. 3: Übersicht ETCS Stufe 2 (vereinfacht)

In der konventionellen Eisenbahnsicherungstechnik wird die Position des Zuges über streckenseitige Sensoren (z.B. Achszähler) bestimmt. Eine Positionsangabe bezieht sich auf einen sogenannten Sicherungsblock oder Sicherungsabschnitt. Die Position auf dem Gleisnetz ist durch eine Streckennummer mit einer Kilometerangabe gekennzeichnet. Im Rahmen moderner kommunikationsbasierter Zugleit- und Sicherungssysteme wie ETCS sind elektronische Wegmarken (ETCS-Eurobalisen) im Gleis verbaut. Das Zugsicherungssystem auf dem fahrenden Zug bezieht sich bei seiner Positionsangabe nun auf die zuletzt überfahrene Wegmarke, die Richtung der Überfahrt und die Distanz, die der Zug seit der Überfahrt auf seinem Fahrweg zurückgelegt hat. Die Position der Zugspitze wird an die ETCS-Streckenzentrale via GSM-R (siehe EURORADIO in SUBSET-037) übertragen. Das Protokoll der botschaftsbezogenen Kommunikation ist in SUBSET-026 definiert. Das infrastrukturseitige Zugsicherungssystem (hier: ETCS-Streckenzentrale) kann aus dieser Positionsangabe wieder auf den Sicherungsblock und die Streckennummer mit Kilometrierung schließen.

Als Leitsystem kann die ETCS-Streckenzentrale aus den Informationen und Freigaben von Leitstelle und Stellwerk eine Fahrtfreigabe generieren und via GSM-R an die ETCS-Zugausrüstung übertragen. Über eine ETCS-Fahrerstandsanzeige (Abschnitt 2.2.3) ist der Triebfahrzeugführer über den Zustand und die Befehle des ETCS-Signalsystems informiert. Ein streckenseitiges Signalsystem ist nicht mehr notwendig. Jedoch wird im Stellwerk noch der konventionelle Sicherungsblock verwendet. Damit überprüft das Stellwerk, z.B. über Achszähler am Gleis, die Position des Zuges und die Vollständigkeit des Zuges beim Übergang zwischen zwei Sicherungsblöcken.

Als Zugsicherungssystem überwacht die ETCS-Fahrzeugausrüstung die Bewegung des Schienenfahrzeuges und vergleicht es mit dem aus der ETCS-Streckenzentrale übertragenen Fahrtfreigaben. Bei einer bevorstehenden Verletzung der Fahrtfreigabe werden dem Triebfahrzeugführer (Tf) erst Warnmeldungen angezeigt. In einer finalen Eskalation wird automatisch eine Zwangsbremmung eingeleitet.

Die Einführung von ETCS und die Migration vorhandener Zugsicherungssysteme ergeben eine Vielzahl möglicher Systemarchitekturen. Im ETCS-System ist dies durch die Definition von Funktionsstufen (engl: Level, im Folgenden als (ETCS-)Stufe abgekürzt) abgebildet. In der ETCS-Spezifikation SUBSET-026-2 werden ETCS-Stufen von Null bis Drei und die Stufe STM/NTC (in Baseline 2: Level STM (Specific Transmission Module), entspricht in Baseline 3: Level NTC (National Train Control)) definiert. Innerhalb einer ETCS-Stufe sind ETCS-Modi (SUBSET-026-4) definiert, die verschiedene Betriebszustände beschreiben [7].

In der vorliegenden Arbeit ist das ETCS-System im Zustand ETCS Stufe 2, Modus „Full Supervision“ (FS). Die hierfür relevanten Systemkomponenten und Eigenschaften des ETCS-Systems werden im Folgenden für diesen Zustand vorgestellt, um in Kapitel 5 daran Simulationsmodelle abzuleiten.

2.2.1 ETCS-Streckenzentrale / ETCS Radio Block Center

Der infrastrukturseitige Kommunikationspartner des GSM-R ist die ETCS-Streckenzentrale (Radio Block Center, RBC). Sie verfügt über eine digitale Karte der Streckeninfrastruktur und hält permanente Verbindung zu allen ETCS-überwachten Zügen in ihrem Zuständigkeitsbereich. Aus den Positionsdaten der Züge, den Informationen des Stellwerkes über den dynamischen Zustand des Gleisnetzes (Weichen, Signale, Fahrstraßen, ...) und den Informationen von Leitsystemen zum Fahrplan und Disposition erstellt die ETCS-Streckenzentrale entsprechende Fahrtberechtigungen für die überwachten Züge. Über eine Kommunikationsschnittstelle (SUBSET-098) werden die ETCS-überwachten Zugfahrten von einer ETCS-Streckenzentrale an die nächste ETCS-Streckenzentrale übergeben (SUBSET-039).

Die Schnittstelle zu einem Stellwerk ist aufgrund der Vielzahl an existierenden Stellwerksbauformen und -varianten nicht Teil der ETCS-Spezifikation und wird durch angepasste Lösungen umgesetzt. Zur Vereinheitlichung des Datenaustauschs zwischen Stellwerk und Zugsicherungssystemen, wie LZB oder ETCS, wurde von der Deutschen Bahn AG das IP-basierte sichere, hochverfügbare und redundante Datenprotokoll SAHARA entwickelt [8]. Das SAHARA-Protokoll ist eine Übertragungsschicht mit verschiedenen Sicherheits- und Zuverlässigkeitsmechanismen [9, S. 98ff]. Darauf aufbauend wird das Protokoll „H3 SZS“ für die Telegrammfestlegung zwischen Elektronischem Stellwerk und LZB bzw. ETCS eingesetzt. Das von der UIC in den Jahren 2008 bis 2012 durchgeführte Projekt INESS erarbeitete die Grundlagen und Anforderungen eines künftigen Standards für eine europaweit einheitliche und vollständig ETCS-kompatible Stellwerkstechnik, dessen Entwicklung im Projekt NeuPro [10] fortgeführt wird.

2.2.2 ETCS-Fahrzeugausrüstung

Die ETCS-Fahrzeugausrüstung (Abb. 4) fasst alle Teile des ETCS-Systems zusammen, die auf dem Schienenfahrzeug installiert sind. Die zentrale Komponente ist der ETCS-Fahrzeugrechner (On-Board Unit, OBU). Hardwareplattform und Rechnerkern ist der European Vital Computer (EVC), der alle Aufgaben der Informationsverarbeitung übernimmt. Hauptaufgabe dieser Komponenten ist die kontinuierliche Überwachung der Fahrgeschwindigkeit und Bremskurven, außerdem wickelt der EVC die Kommunikation mit der ETCS-Streckenzentrale und dem Triebfahrzeugführer ab. An dem ETCS-Fahrzeugsteuergerät befinden sich die Schnittstellen zu allen beteiligten Bordkomponenten (Abb. 2).

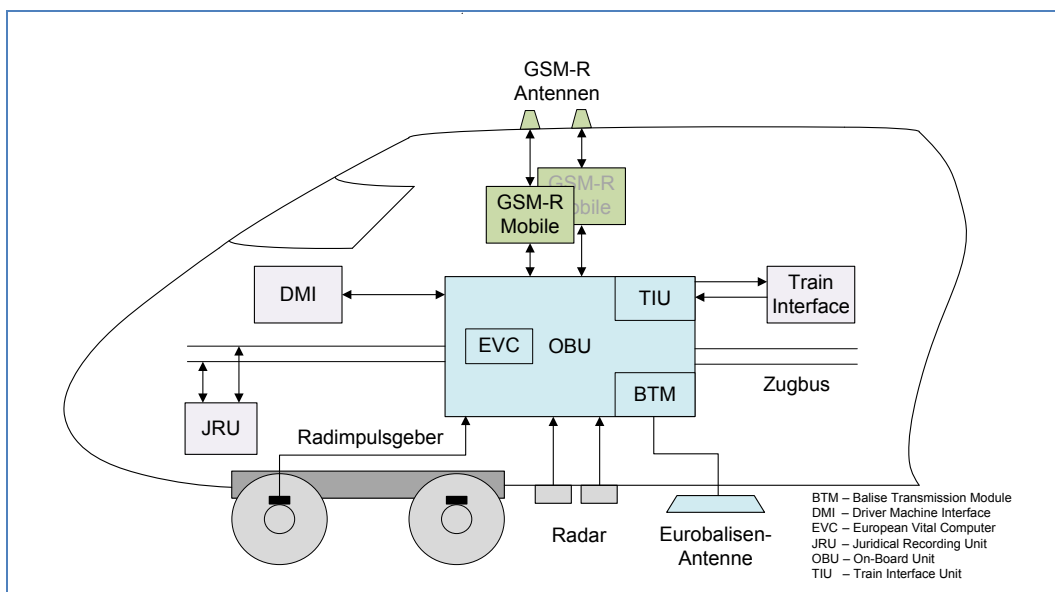


Abb. 4: ETCS-Fahrzeugausrüstung (nach [3])

Die technische Umsetzung der funktional beschriebenen Eigenschaften der ETCS-Fahrzeugausrüstung ist nicht spezifiziert und den Schienenfahrzeugherstellern und Zulieferern überlassen. Jedoch ist in SUBSET-076 ein detaillierter Testplan vorgeschrieben, der das externe Verhalten des EVC (in SUBSET-026 spezifiziert) prüft [3]. Die Deutsche Bahn AG entwickelt mit Industriepartnern im Projekt openETCS [11] eine quellenoffene Implementierung und Software-Werkzeugkette eines ETCS-Fahrzeugsteuergerätes.

Die ETCS-Fahrzeugausrüstung greift über die ETCS-Fahrzeugschnittstelle (Train Interface Unit, TIU) direkt auf die Fahrzeugsysteme zu. Dazu gehören je nach Ausstattung des Schienenfahrzeuges neben den Bremsen auch weniger sicherheitsrelevante Funktionen, wie das Heben und Senken des Stromabnehmers, die Steuerung der Druckschutzklappen in der Luftzufuhr bei Tunnelfahrten von druckertüchtigten Zügen oder die Beschränkung der erlaubten Leistungsaufnahme aus dem Stromnetz.

Die funktionalen Anforderungen sind in SUBSET-034 spezifiziert, jedoch ist die technische Ausführung nicht festgelegt. Viele Hersteller nutzen eine herstellerseitig genormte (Bus-)Schnittstelle zwischen einem universellen ETCS-Fahrzeugsteuergerät und einem fahrzeugspezifischen Kompatibilitätsmodul.

2.2.3 ETCS-Fahrerstandsanzeige (ETCS Driver Machine Interface, DMI)

Die Benutzerschnittstelle der ETCS-Fahrzeugausrüstung zum Triebfahrzeugführer wird durch die im Fahrerstand verbauten Geräte: GSM-R-Funkgerät und die grafische Bedienoberfläche (ETCS-DMI, Driver Machine Interface) gebildet. Wichtige Größen, die dem Triebfahrzeugführer auf dem DMI angezeigt werden müssen, sind unter anderem:

- Funktionsstufe (Level) und Betriebsmodus der ETCS-Ausrüstung
- die aktuelle Höchstgeschwindigkeit
- die Zielgeschwindigkeit ab der nächsten Geschwindigkeitsänderung und
- die Zielentfernung bis zur nächsten Geschwindigkeitsänderung

Hinzu kommen Warnmeldungen bei drohender Überschreitung der Höchstgeschwindigkeit sowie von der ETCS-Fahrzeugausrüstung ausgelöste Bremsbedienhandlungen (z.B. eine Zwangsbremse). Der Triebfahrzeugführer nutzt das DMI vor Fahrtantritt zur Eingabe zugspezifischer Daten wie Zugnummer, Zuglänge und Bremsausstattung des Zuges. Die Bedienoberfläche wurde nach ergonomischen Gesichtspunkten entwickelt [12].

Das bildschirmbasierte Anzeigegerät ist in zwei verschiedenen Ausführungen genormt ([6], ERTMS-015560). Eine Variante mit Touchscreen und eine Variante mit Tasten (Soft Keys) variabler Belegung am Rand des Bildschirms (Abb. 5). Das funktionale Bildschirmlayout ist bei beiden Ausführungen identisch.

Die technische Umsetzung der funktionalen Anforderungen an das DMI ist dem Hersteller freigestellt. Jedoch haben sich zwei grundlegende Strukturen herausgebildet [3]. Wird das DMI als eigenständiges Steuergerät angesehen, dann untersucht das DMI-Steuergerät eigenständig die vom ETCS-Fahrzeugsteuergerät (OBU) empfangenen Daten und entscheidet eigenständig, welche Daten angezeigt werden. Das DMI kann auch als reine Anzeigeeinheit mit wenig eigenständiger Intelligenz angesehen werden, um die vom ETCS-Fahrzeugsteuergerät (OBU) vorgegebenen Daten anzuzeigen. Die funktionalen Anforderungen an die Datenschnittstelle sind in SUBSET-033 [6] festgelegt.

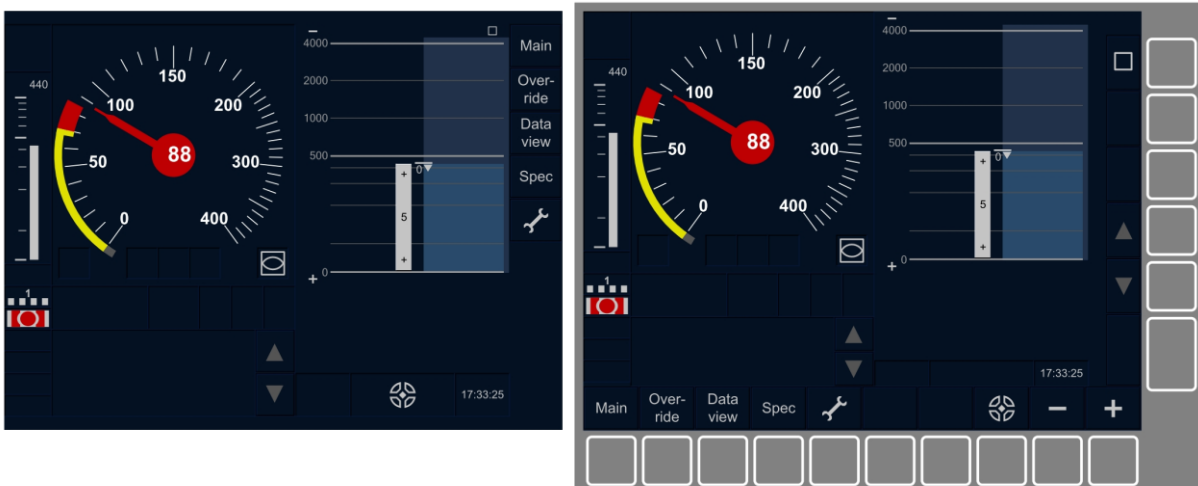


Abb. 5: ETCS-DMI mit aktivierter Zwangsbremse, mit Touchscreen (links), mit Soft Keys (rechts) ([6] ERTMS-015560 S. 73 Figure 53 – Brake Intervention)

In der ETCS Baseline 2 wird das Anzeigegerät als Man-Machine-Interface (MMI) bezeichnet. In der ETCS Baseline 3 wird für das Anzeigegerät der Begriff Driver-Machine-Interface (DMI) genutzt. Zur einheitlichen Bezeichnung des ETCS-Anzeigegerätes wird in dieser Arbeit durchgängig der Begriff Driver-Machine-Interface (DMI) verwendet.

2.2.4 Kommunikation über GSM-R und EURORADIO

Das GSM-R-System stellt auf mit ETCS Level 2 ausgerüsteten Strecken eine permanent verfügbare Daten- und Sprachkommunikation zwischen der ETCS-Fahrzeugausrüstung und der ETCS-Streckenzentrale her [3].

Aufbauend auf dem digitalen Mobilfunkstandard GSM wurden in den Projekten EIRENE, MORANE und später im Rahmen von ERTMS die Spezifikationen für einen europaweit einheitlichen digitalen Bahnfunkstandard GSM-R zur signaltechnisch sicheren Übertragung von Sprach- und Datenkommunikation entwickelt [3]. Die Anwendungsdaten werden zur sicheren Identifizierung der Kommunikationspartner und einer Verschlüsselung der Nutzdaten in das EURORADIO-Protokoll verpackt (SUBSET-037). Die so verschlüsselten Daten werden mit GSM-R als drahtlose Transportebene zwischen Infrastruktur und Schienenfahrzeug übertragen.

2.2.5 ETCS-Eurobalise

ETCS-Eurobalisen sind elektronische Wegmarken des ETCS-Systems (spezifiziert in SUBSET-036), die in der Mitte des Gleises verlegt sind. Sie dienen zur punktförmigen Kommunikation zwischen der Fahrstrecke (Infrastruktur) und dem Schienenfahrzeug und können über eine Empfangseinrichtung (Balise Transmission Module, BTM) auf

dem Schienenfahrzeug ausgelesen werden. Das BTM-Modul besteht mindestens aus einer Schnittstellenkarte im ETCS-Schaltschrank und einer Balisenantenne unter dem Schienenfahrzeug. ETCS-Eurobalisen sind in Balisengruppen verlegt und werden im ETCS-System als absolute Positionsreferenz genutzt. Durch die Richtung der Überfahrt und der seit der Überfahrt zurückgelegten Distanz ist die Position des Zuges auf dem gelegten Fahrweg eindeutig.

Festdatenbalisen (Abb. 7) enthalten einen statischen Dateninhalt und werden ohne elektrische Anbindung im Gleis verlegt. Bei Transparentdatenbalisen (nur ETCS Level 1) wird der veränderbare Dateninhalt durch einen peripheren Stellwerksteil (Lineside Electronic Unit, LEU) leitungsbasiert über eine elektrische Verbindung vorgegeben. Der Datenbestand wird an jeden vorüberfahrenden Zug gesendet. Innerhalb einer Balisenbotschaft können mehrere standardisierte Nachrichtenblöcke (sogenannte ETCS-Packets) enthalten sein. ETCS-Eurobalisen werden in Balisengruppen (Abb. 6) von zwei bis acht Balisen verlegt. Hierdurch ist die Übertragung einer größeren Datenmenge möglich. Aus der Reihenfolge der von dem Schienenfahrzeug eingelesenen Balisen innerhalb der Balisengruppe ist die Richtung der Überfahrt eindeutig.

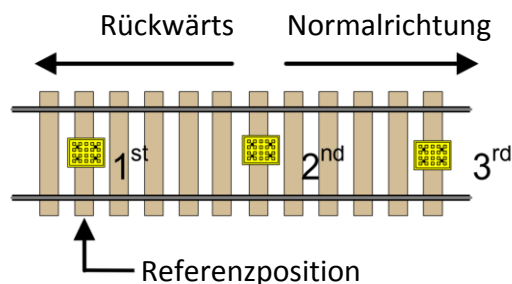


Abb. 6: Richtungs- und Referenzpunktdefinition einer ETCS-Balisengruppe nach SUBSET-027

Die Datenübertragung von der Balise zum Schienenfahrzeug erfolgt drahtlos über die Luftschnittstelle ähnlich wie bei der RFID-Technologie (Radio-Frequency Identification, RFID). Hierbei wird der Transponder durch ein elektromagnetisches Feld mit einer Frequenz von 27,095 MHz aus der Fahrzeugantenne mit Energie versorgt. Die aktivierte ETCS-Eurobalise sendet daraufhin seine Daten frequenzmoduliert (logisch Null mit 3,951 MHz und logisch Eins mit 4,516 MHz) mit einer mittleren Datenrate von 564,48 kbit/s aus (SUBSET-036). Eine einzelne Balise hat 830 Bit Nutzdaten von insgesamt 1023 Bit Dateninhalt.

Das Protokoll der Luftschnittstelle zwischen ETCS-Eurobalise und dem Lesegerät auf dem Schienenfahrzeug wird durch das SUBSET-027-7 spezifiziert.

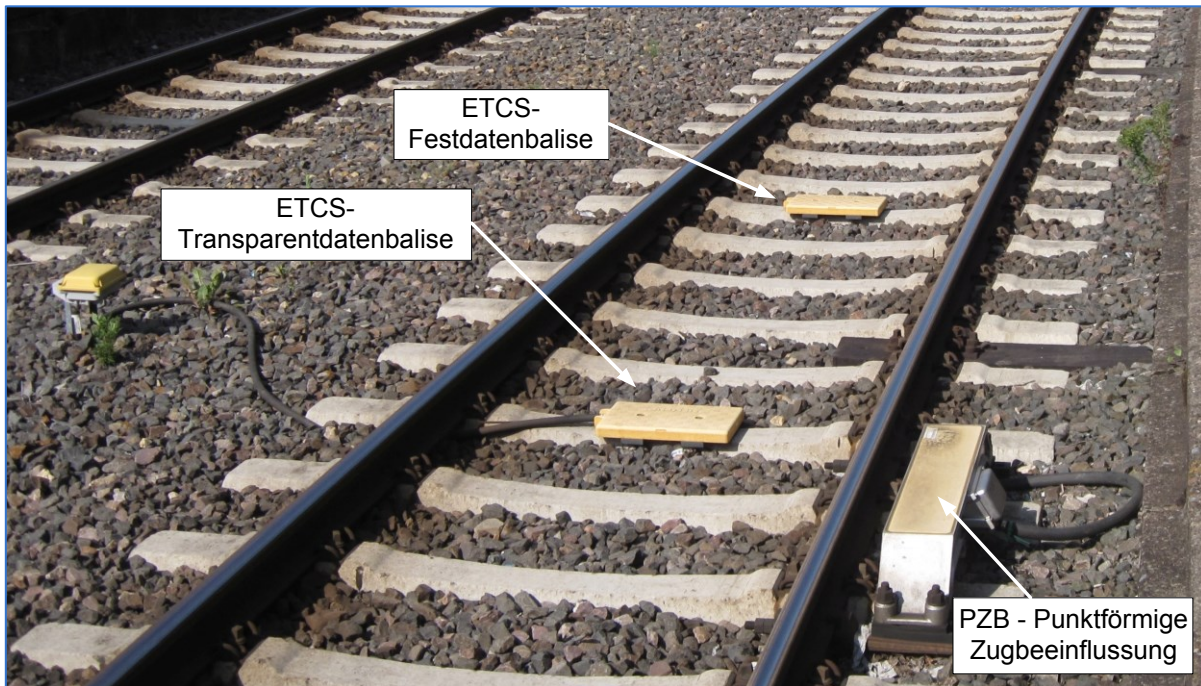


Abb. 7: Im Gleis verlegte ETCS-Eurobalisen, Transparentdatenbalise (mit Kabelanschluss) und Festdatenbalise (ohne Kabelanschluss), 9.7.2016, Aachen Hbf: Gleis 8E

2.2.6 Datenformat der ETCS-Kommunikation

Das Format der übertragenen Nutzdaten bei ETCS ist unabhängig von dem eingesetzten Übertragungsmedium. Für Eurobalisen, Euroloop, Radio-Infill und GSM-R wird dasselbe Protokoll (spezifiziert in SUBSET-026) benutzt. Das Protokoll (Abb. 8) lässt sich aufgliedern in die Elemente: Nachricht (Message), Paket und Variable.

Nachrichten sind in SUBSET-026-8 spezifiziert. Jede der verschiedenen Nachrichten hat eine eigene Message-ID und ist jeweils nur für eine Kommunikationsrichtung zugelassen (Track-to-Train oder Train-to-Track). Nachrichten bestehen aus einem oder mehreren Paketen und gegebenenfalls einzelnen Variablen. Hinzu kommt je nach Übertragungsmedium ein entsprechender Header.

Die Pakete sind in SUBSET-026-7 (Abschnitt 7.4) spezifiziert. Pakete sind ebenfalls an eine Richtung gebunden und werden durch eine eindeutige Paket-ID identifiziert. Ein Paket setzt sich aus einer definierten Auflistung von Variablen zusammen. Abhängig von bestimmten Bedingungen können einzelne Variablen oder Variablensequenzen mehrfach wiederholt werden (beispielsweise zur Übertragung eines Geschwindigkeitsprofils mit variabler Anzahl an Diskontinuitäten). Daher wird die Paketlänge zu Beginn des Pakets in einer eigenen Variable übertragen. Die Auflistung der benannten Variablen, ihre Bedeutung, Länge und Wertebereiche ist in SUBSET-026-7 (Abschnitt 7.5) enthalten.

Nachrichten

[SUBSET-026-8]

8.5.2 Train to Track radio messages

Msg.ID	Message Name
129	Validated Train Data
130	Request for Shunting
132	MA Request
136	Train Position Report
137	Request to shorten MA is granted
138	Request to shorten MA is rejected
146	Acknowledgement
147	Acknowledgement of Emergency Stop
149	Track Ahead Free Granted
150	End of Mission
153	Radio in-fill request
154	No compatible version supported
155	Initiation of a communication session
156	Termination of a communication session
157	SoM Position Report
158	Text message acknowledged by driver
159	Session Established

8.6.1 Message 129:
Validated Train Data

No.	VARIABLE/ PACKET
1	NID_MSG
2	L_MSG
3	T_TRAIN
4	NID_ENGINE
5	Packet 0 or 1
6	Train data

(packet 11)

Pakete

[SUBSET-026-7]

7.4.3 PACKETS: TRAIN TO TRACK

7.4.3.1 Packet Number 0: Position Report

Description	This packet is inserted in all train-to-track telegrams and is used to report the train position and speed as well as some additional information (e.g. mode, level)			
Transmission media	Radio			
Content	Variable	Length	Comment	
	NID_PACKET	8		
	L_PACKET	13		
	Q_SCALE	2		
	NID_LRBG	10 + 14		
	D_LRBG	15		
	Q_DIRLRBG	2		
	Q_DLRBG	2		
	L_DOUBTOVER	15		
	L_DOUBTUNDER	15		
	Q_LENGTH	2		
	L_TRAININT		If Q_LENGTH = "Train integrity confirmed by integrity monitoring device" or "Train integrity confirmed by driver"	
	V_TRAIN	7		
	Q_DIRTRAIN	2		
	M_MODE	4		
	M_LEVEL	3		
	NID_STM	8		If M_LEVEL = STM

7.5 Definitions of Variables

7.5.1.129 Q_SCALE

Name	Qualifier for the distance scale		
Description	Qualifier to indicate the same scale used for describing all distances inside the packet that contains Q_SCALE		
Length of variable	Minimum Value	Maximum Value	Resolution/formula
2 bits			
Special/Reserved Values	0		10 cm scale
	1		1 m scale
	2		10 m scale
	3		Spare

7.5.1.13 D_LRBG

Name	Distance between the last relevant balise group and the estimated front end of the train (the side of the active cab)		
Description			
Length of variable	15 bits	Minimum Value	Maximum Value
Special/Res. Values		0 cm	327 660 km
		32767	Unknown
		Resolution/formula depends on Q_SCALE	

7.5.1.172 V_TRAIN

Actual Train speed			
Name			
Description			
Length of variable	Minimum Value	Maximum Value	Resolution/formula
7 bits	0 km/h	600 km/h	5 km/h
Special/Res. Values	121-127	Spare	

Variablen

[SUBSET-026-7]

Abb. 8: Aufbau des ETCS-Datenformates

2.3 Aufbau eines Schienenfahrzeuges

Schienenfahrzeuge gibt es in einer großen Variantenvielfalt. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen Personen- und Güterverkehr. Im Güterverkehr ziehen ein oder mehrere Güterzuglokomotiven einen Zug aus Güterwagen. Im Personenverkehr kann man zwischen antreibenden Lokomotiven, nicht angetriebenen Reisezugwagen und Triebzügen unterscheiden. Weiterhin gibt es eine große Zahl an Sonderfahrzeugen, die vor allem für Infrastrukturzwecke genutzt werden.

Schienenfahrzeuge werden auf die Kundenwünsche und den vorgesehenen Aufgabenbereich angepasst. (Mit Kunden sind hier institutionelle Besteller von Schienenfahrzeugen, meist Eisenbahnverkehrsunternehmen, gemeint. Fahrgäste nehmen hier nur indirekt Einfluss.) Dadurch entstehen bei Herstellern auch innerhalb von Fahrzeugplattformen unterschiedliche Ausstattungsvarianten und Anpassungen für die verschiedenen Kunden. Grundlegende Strukturen sind in der Mehrzahl der Schienenfahrzeuge ähnlich.

Alle Schienenfahrzeuge verfügen über einen langgezogenen Wagenkasten. Unter dem Wagenkasten sind meist zwei drehbar gelagerte Fahrwerke angeordnet. Die Fahrwerke haben ein bis drei Radpaare, die zu Radsätzen verbunden sein können, und die Verbindung zu den Gleisen herstellen. Die Bewegung der Einzelräder oder Radsätze können durch eine Vielzahl von Antriebs- und Bremsaktuatoren beeinflusst werden.

Als Fahrzeugtechnik werden alle aktiven Systeme angesehen, die Energie wandeln oder Informationen verarbeiten. Dazu zählen die Antriebs- und Bremssysteme, Nebenaggregate sowie die elektrischen und elektronischen Komponenten wie Umrichter, Steuergeräte und Kommunikationssysteme. Traditionell wird ein Schienenfahrzeug durch einen Triebfahrzeugführer (Tf) bedient. Die Bedienhandlungen wirken direkt auf die Fahrzeugtechniksysteme oder werden indirekt durch elektronische Steuergeräte und Kommunikationssysteme weitergeleitet.

In modernen Schienenfahrzeugen gibt es eine Vielzahl an elektronischen Komponenten und Steuergeräten, die durch Kommunikationssysteme miteinander verbunden sind. Unter elektronischen Komponenten versteht man hier Sensoren, Taster, Relais usw., die meist direkt an Steuergeräte angeschlossen sind. Übergeordnete Steuergeräte sind an den Zugbus TCN-WTB/ETB [13] angeschlossen und kommunizieren über den gesamten Zugverband. Innerhalb eines Wagens werden in umfangreichen Architekturen verschiedene Feldbussysteme wie TCN-MVB, CAN und ethernet-basierte Feldbusse (z.B. ProfiNet) zur Kommunikation zwischen den Steuergeräten eingesetzt. Zwischen den Steuergeräten und Sensoren oder Aktoren werden Spannungs- oder Stromschnittstellen, serielle Schnittstellen (RS-232/RS-422/RS-485) und halbdigitale Schnittstellen wie Rechteck-Frequenz- oder PWM-Signale verwendet.

Elektronische Systeme stellen inzwischen einen funktionswichtigen Bestandteil eines modernen Schienenfahrzeuges dar. Die Informationsverarbeitung und Weiterleitung führt zu sehr komplexen Hard- und Softwaresystemen und internen wie externen ebenfalls aufwendigen Steuergeräte- und Softwarearchitekturen. Die Möglichkeit der Datenverarbeitung erlaubt die Nutzung neuer Funktionalitäten von Gleitschutzsystemen, Zugleit- und Sicherungssystemen bis zu Fahrgastanzeigen. Dies führt zu neuen Anforderungen an die Informationsgewinnung und Zustandsermittlung von Fahrzeugeigenschaften durch Sensorik. Im folgenden Abschnitt wird die für diese Arbeit besonders interessante Bewegungssensorik auf einem Schienenfahrzeug dargestellt, deren Signale in Steuergeräten für Brems-, Gleitschutz- sowie modernen Zugleit- und Sicherungssystemen verwendet werden.

2.4 Konventionelle Odometriesysteme und Bewegungssensorik

Ein konventionelles Odometriesystem auf einem Schienenfahrzeug hat die Aufgabe signalsicher, hochverfügbar und in Echtzeit die eindimensionale Geschwindigkeit und Distanz des Schienenfahrzeuges entlang des Fahrweges zu bestimmen. Hierfür werden mehrere komplementäre Sensoren zu einem eindimensionalen Geschwindigkeits- und relativen Distanzsignal fusioniert.

Das Geschwindigkeitssignal wird für die Fahrzeugführung und die Zugsicherung verwendet. Das signalsichere Distanzsignal ist bei modernen Zugsicherungssystemen zur Bestimmung der absoluten Streckenposition notwendig.

Die Anforderungen an die Qualität des Odometriesystems werden von den Systemen abgeleitet, die Odometriesignale nutzen. Das Zugsicherungssystem ETCS legt fest, dass die Distanzabweichung $s_{Abw} \leq 5 \text{ m} + s_{odo} \cdot 5 \%$ der gemessenen Distanz sein muss (SUBSET-041, Abschnitt 5.3.1.1). Die Geschwindigkeitsabweichung zur Überwachung der Höchstgeschwindigkeit nach SUBSET-041 (Abschnitt 5.3.1.2) wird mit $v_{Abw1} = \pm 2 \text{ km/h}$ für Geschwindigkeiten unter 30 km/h angegeben. Im Geschwindigkeitsbereich zwischen 30 km/h und 500 km/h steigt die zulässige Geschwindigkeitsabweichung von $v_{Abw1} = \pm 2 \text{ km/h}$ auf $v_{Abw2} = \pm 12 \text{ km/h}$ linear an. Für das ermittelte Distanz- und Geschwindigkeitssignal hat das Odometriesystem ein Konfidenzintervall anzugeben. Die Echtzeitanforderungen werden in SUBSET-041 nicht beschrieben und sind der technischen Umsetzung überlassen.

In SUBSET-088 (Part 0, Abschnitt 4.1.1.7) wird für das ETCS-Gesamtsystem eine maximal tolerierbare Fehlerrate (THR, Tolerable Hazard Rate) von $THR_{ETCS} \leq 2 \cdot 10^{-9} \text{ Fehler}/(\text{Stunde} \cdot \text{Zug})$ definiert. Die Gesamtfehlerrate THR_{ETCS}

teilt sich zu gleichen Teilen mit je $0,67 \cdot 10^{-9}$ Fehler/(Stunde · Zug) in die Fehleraten der ETCS-Fahrzeugausrüstung $THR_{On-board}$, der ETCS-Signalübertragung $THR_{Transmission}$ und der ETCS-Infrastruktur $THR_{Trackside}$ auf. Das Odometriesystem trägt mit seinen möglichen Fehlerzuständen (SUBSET-091 Annex A Event Id. ODO-1 bis ODO-4) als Teil der ETCS-Fahrzeugausrüstung zu dessen Ausfallwahrscheinlichkeit bei.

Das Odometriesystem für eine ETCS-Fahrzeugausrüstung fusioniert üblicherweise mehrere Radimpulsgeber und ein Doppler-Radar. Die Odometriefunktionalität kann im EVC-Rechner (Abschnitt 2.2.2) integriert sein oder als ein eigenständiges Gerät mit einer Feldebusschnittstelle an die ETCS-Fahrzeugausrüstung angeschlossen werden [14]. An alternativer Odometrie-Sensorik, insbesondere an der Integration von Satellitennavigation, wird intensiv geforscht. Der Stand der Forschung von Satellitennavigation in Odometriesystemen wird in Abschnitt 3.1.4 beschrieben. Detaillierte Informationen enthalten auch die Modellbeschreibungen der Sensoren in Kapitel 5. Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über die verwendeten konventionellen Odometriesensoren.

2.4.1 Radimpulsgeber und Encoder

Der immer an einem Schienenfahrzeug verbaute Odometriesensor ist der Radimpulsgeber (RIG, Abb. 9), auch Wegimpulsgeber genannt. Der Radimpulsgeber und, der nach einem optischen Messprinzip arbeitende, Encoder werden üblicherweise zwischen dem am Drehgestell befestigten Achslager und der rotierenden Radsatzwelle verbaut. Somit können sie die Drehung des Radsatzes im Achslager messen. Über die Geometrie des Radsatzes lässt sich die Umfangsgeschwindigkeit des Radsatzes auf den Laufflächen der Räder bestimmen. Für dieses Messprinzip wird angenommen, dass die Umfangsgeschwindigkeit des Radsatzes der translatorischen Relativgeschwindigkeit zwischen Fahrzeug und Schiene entspricht. In dem Kontaktpunkt zwischen Rad und Schiene ergibt sich durch Schlupf ein Geschwindigkeitsunterschied. Daher werden Messprinzipie, die aus der Radsatzumdrehung die Distanz oder Geschwindigkeit messen, immer charakteristische Abweichungen aufweisen.

In Abb. 9 (links) ist am Achslager RS1L ein einkanaliger Radimpulsgeber (45° nach links geneigt) für das Gleitschutzsystem und ein experimenteller zweikanaligen Radimpulsgeber (45° nach rechts geneigt) am Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ dargestellt. Die rechte Seite der Abb. 9 zeigt einen Encoder am gegenüberliegenden Radsatzlager RS1R für das ZUB262 Zugsicherungssteuergerät.

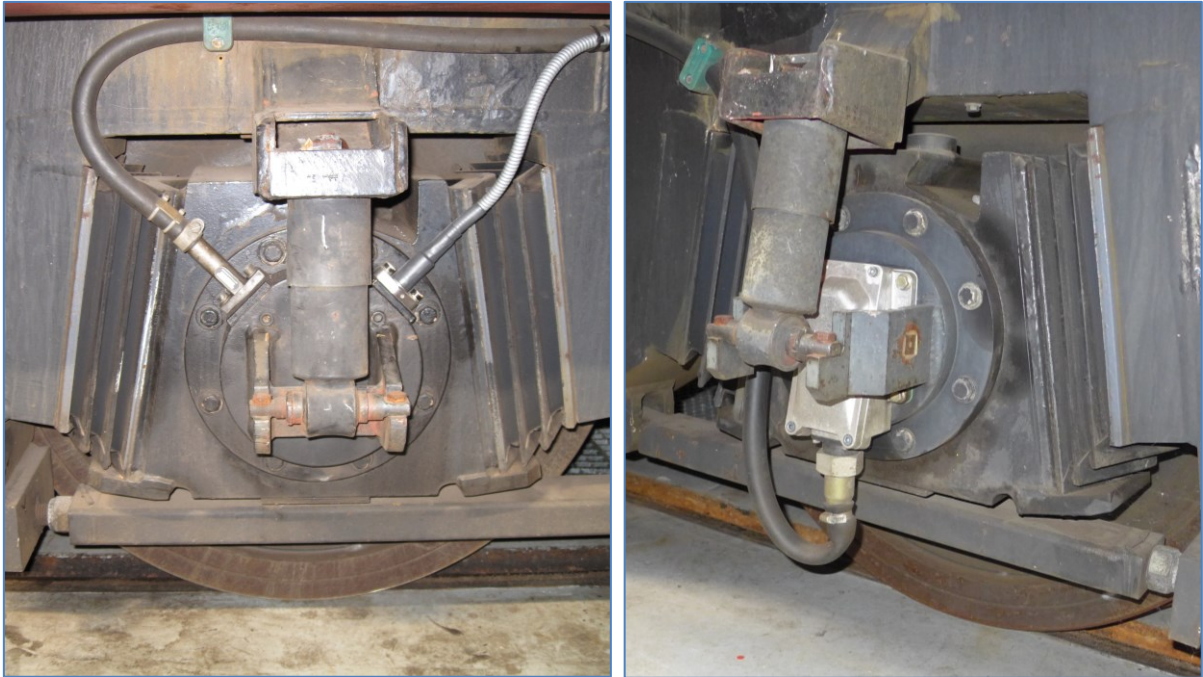


Abb. 9: (links) Radsatzlager mit zwei Radimpulsgebern, (rechts) Encoder am Radsatzlager

Das Messprinzip (Abb. 10) des Radimpulsgebers basiert auf einem ferromagnetischen Polrad, das auf der Radsatzwelle (neben dem Radsatzlager) befestigt ist, und einem im Radsatzlagergehäuse eingebauten Hall-Sensor. Bei der Bewegung eines Polradzahnes vor dem Sensorelement erzeugt der Sensor ein Rechtecksignal (Abb. 11) an der elektrischen Schnittstelle.

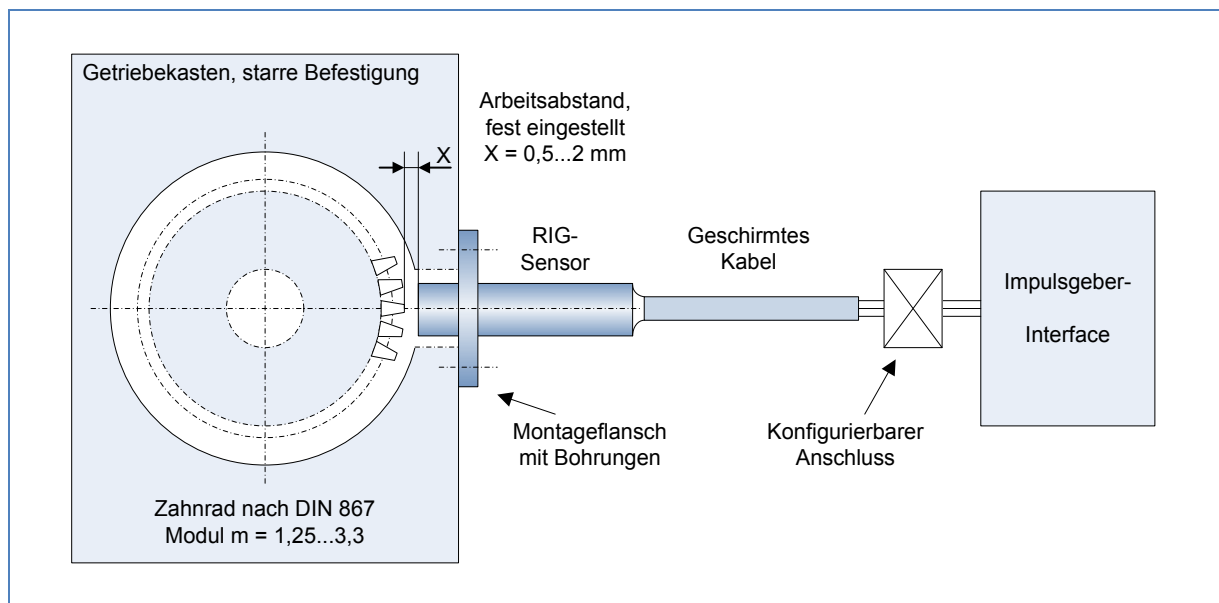


Abb. 10: Prinzip eines Radimpulsgebers, nach [15]

Diese Sensoren werden als einkanalig bezeichnet, wenn sie nur einen Messkanal mit einem Rechtecksignal ausgeben können. In einer zweikanaligen Ausführung liest ein um einen $\pm 1/4$ Polzahnwinkel versetztes zweites Sensorelement die Stellung des Polrades ebenfalls ein. Aus der Phasenverschiebung des Rechtecksignals von $\pm 90^\circ$ zwischen den beiden Sensorsignalen lässt sich die Bewegungsrichtung bestimmen. Mit den zwei Sensorelementen wird auch eine doppelte Flankenanzahl gemessen, was mittels Quadratureingang zur Verdoppelung der Distanzauflösung führt.

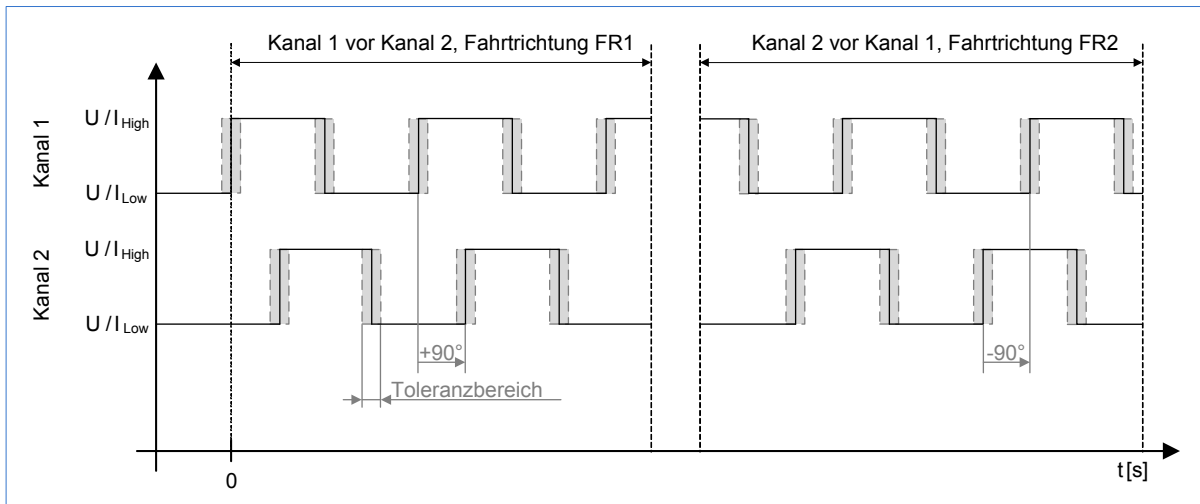


Abb. 11: Rechtecksignal eines zweikanaligen Radimpulsgebers, nach [15]

Aus der Zeitdifferenz zwischen zwei Flanken lässt sich bei bekannter Winkeldifferenz die Umdrehungsgeschwindigkeit bestimmen. Hierbei kann man je nach Anwendung steigende Flanken, fallende Flanken, zwei aufeinander folgende Flanken oder auch die Flanken mit dem zweiten Sensorkanal kombinieren. Die Zeitmessung wird üblicher Weise von hardwarenahen Elektroniken mit einer hohen Zeitauflösung übernommen.

Durch die Zählung der Flanken und eines bekannten Differenzwinkels zwischen den Flanken kann der Gesamtwinkel berechnet werden. Bei Sensoren mit zwei Sensorkanälen kann dies auch bei wechselnden Bewegungsrichtungen winkelrichtig erfolgen.

Der Flankenabstand des Polrades hat Toleranzen, die bei hochfrequenter Abtastung zu Rauschen der Geschwindigkeitsmessung führen. Je nach Form des Polradzahn wird die fallende Flanke in einem Toleranzbereich zwischen zwei steigenden Flanken eintreten.

2.4.2 Encoder

Encoder basieren auf einem optischen Sensorprinzip, das im Durchlichtverfahren die Transmission des Lichtes durch eine feststehende Schlitplatte und eine sich mit der Welle mitdrehenden Schlitzscheibe misst. Stehen die Schlitze der Schlitplatte und der Schlitzscheibe übereinander, so kann das Licht durchscheinen. Stehen die Licht-

schlitze über den Stegen, kann das Licht nicht durchscheinen. Aus dieser Charakteristik werden zwei binäre Zustände (Licht scheint durch und Licht scheint nicht durch) definiert. Die gemessene Lichtintensität wird dann in ein elektrisches Sensorsignal gewandelt. Encoder können einen zweiten, um eine viertel Periode versetzten, Sensorkanal besitzen. Als eine Periode wird hier ein Schlitz- plus ein Stegwinkel angesehen. Die Anzahl der Pulse pro Umdrehung ist deutlich höher als bei Radimpulsgebern. Daraus ergeben sich eine höhere Winkelauflösung und eine höhere Pulsfrequenz. Häufig ist zusätzlich ein Indexkanal mit einem Rechteckimpuls pro Umdrehung verbaut. Aus dem Indexsignal wird die absolute Winkelposition auf einer Umdrehung bestimmt.

2.4.3 Doppler-Radar

Um unabhängig von der Radsatzumdrehung die Geschwindigkeit eines Schienenfahrzeuges zu messen, werden verschiedene Sensorprinzipien zur Distanz- und Geschwindigkeitsmessung verwendet. Auf Basis des Doppler-Effektes wurden Radarsensoren entwickelt, die unter dem Schienenfahrzeug die Relativgeschwindigkeit zwischen Wagenkasten und Gleisbett messen (siehe Abb. 12). Als diversitärer Geschwindigkeitssensor werden Doppler-Radare in ETCS-Fahrzeugausrüstungen eingesetzt.

Das Sensorprinzip geht davon aus, dass die ausgesendete Radarstrahlung durch die raue Oberfläche des Gleisbettes teilweise wieder zu einem Empfänger reflektiert wird.

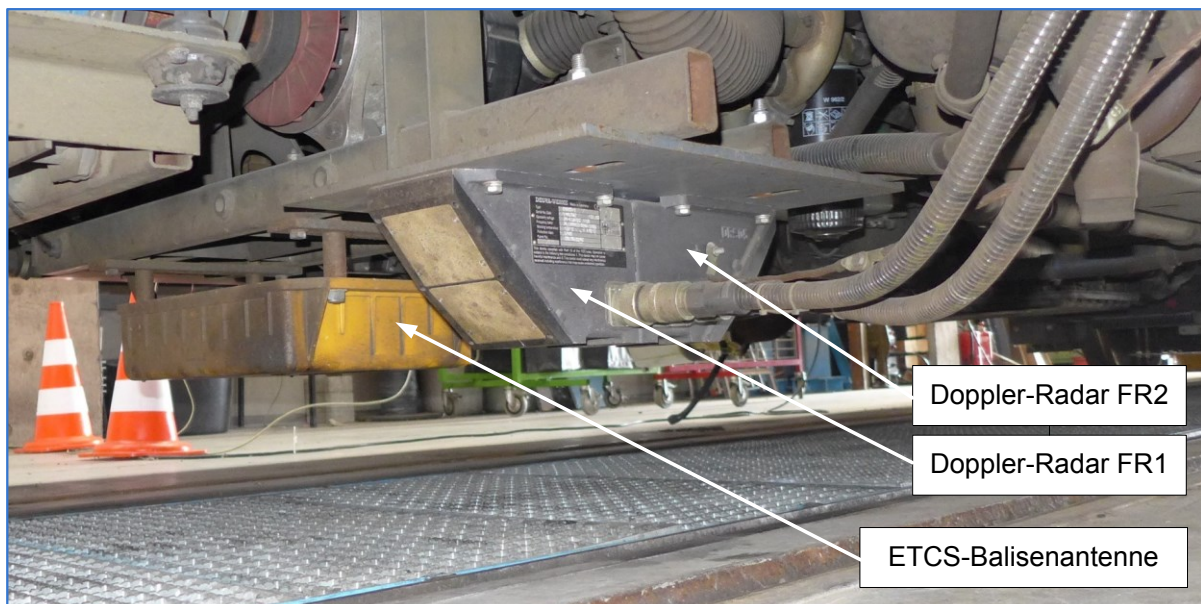


Abb. 12: Experimentelle Anordnung von zwei Deuta DRS05 Doppler-Radaren am Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“, Hintergrund: Siemens ETCS-Eurobalisenantenne

Aus der Phasen- und Frequenzverschiebung zwischen ausgesendeter und empfangener Radarstrahlung wird die Relativgeschwindigkeit bestimmt.

Wasser und Schnee kann die Radarstrahlung dämpfen, sodass der Sensor ausfallen kann. Glatte Oberflächen können die Radarstrahlung reflektieren und zu Störungen führen. Doppler-Radare weisen eine untere Grenzhgeschwindigkeit (Deutscher Wetterdienst DRS05: $v_{min} \approx 0,4 \text{ km/h}$) auf und sind zur Stillstandsbestimmung nicht geeignet.

2.5 Geodätische Grundlagen

In Abschnitt 2.1 wurde der im Eisenbahnumfeld übliche Positionsbegriff aus Streckennummer mit Kilometrierung oder als Distanz nach einer ETCS-Eurobalise eingeführt. In diesem Abschnitt wird der Positionsbegriff aus der Geodäsie oder Satellitennavigation als eine dreidimensionale, absolute Geoposition in einem standardisierten Referenzkoordinatensystem verwendet. Dies bildet die Grundlage, um in der Simulationsumgebung den Fahrweg standardisiert zu beschreiben und globale und lokale Koordinatensysteme ineinander umzurechnen.

2.5.1 Erdfigur und Bezugssysteme

In der Geodäsie unterscheidet man zwischen Horizontal- bzw. Lagemessung, Vertikal- bzw. Höhenmessung und Schweremessung (Erdschwerepotenzial aus Erdgravitationspotenzial und Erdflyhkraftpotenzial). Für die Lage, Höhe und Schwere werden unabhängige Referenz- bzw. Bezugssysteme verwendet.

Zur allgemeinen Beschreibung der Erdoberfläche wird die Erdfigur als eine mathematische Grundform angenommen. Das lokale Höhenprofil der Erde gibt man als Höhe über der Grundform an. Im Laufe der Geschichte haben sich verschiedene Grundformen entwickelt:

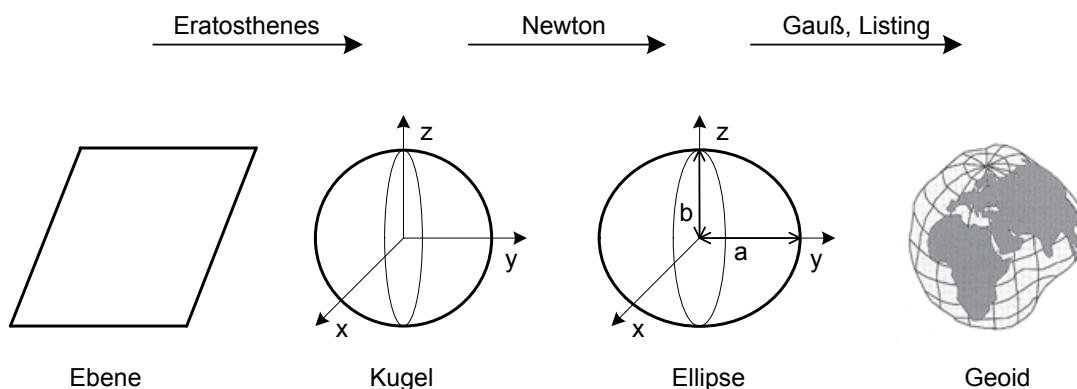


Abb. 13: Geodätische Bezugsflächen, nach [16]

In den ersten Beschreibungen wurde die Erdoberfläche als Ebene und später als Kugel angenommen (Abb. 13). Mit Newton wurde das Rotationsellipsoid eingeführt, um die Abplattung der Erde an den Polen genauer anzunähern. Neben den rein geometrisch festgelegten Erdgestalten ist die Erdfigur des Geoids auf ein festgelegtes Schwerepotenzial als eine idealisierte physikalische Ersatzfläche definiert. Auf der Niveaulfläche des Geoids steht das Lot in allen Punkten senkrecht. Die Abweichung (Undulation) zwischen Geoid und Rotationsellipsoid ist an den meisten Stellen gering. Die maximale Undulation beträgt rund 100 m [17].

Als Basiskoordinatensystem für ein globales Bezugssystem wird ein dreidimensionales geozentrisches kartesisches Koordinatensystem definiert, dessen Koordinatenursprung sich im Erdschwerpunkt befindet (geozentrisch gelagert). Darin lässt sich die Erdoberfläche als Kugel, Rotationsellipsoid oder Geoid beschreiben. Das Bezugssystem WGS84 (World Geodetic System 1984) [18] wird als ein globales Bezugssystem (Datum) für das GPS- und Galileo-Satellitenavigationssystem verwendet. Es enthält das kartesische, geozentrisch gelagerte Basiskoordinatensystem ECEF (Earth Centered Earth Fixed), dass folgendermaßen definiert ist [19]:

- Die Z-Achse fällt mit der mittleren Erdrotationsachse zusammen.
- Die XZ-Ebene wird durch die Z-Achse und einen definierten Punkt auf der Erde (z. B. die Sternwarte von Greenwich) festgelegt.
- Die X-Achse verläuft in der zur Z-Achse gehörenden Äquatorebene.
- Die Y-Achse steht senkrecht zur Z- und X-Achse und bildet ein Rechtssystem.

Ein globales Bezugssystem lässt sich indirekt durch global verteilte Beobachtungsstationen festlegen. Aufgrund globaler geodynamischer Phänomene, wie Erdbeben und Plattentektonik, können sich die terrestrischen Netzknoten des „International Terrestrial Reference Systems“ (ITRS) um bis zu 2 cm/Jahr verschieben. Die Konfiguration der Messpunkte auf der eurasischen Platte ist nahezu konstant und bildet die Grundlage für das europäische Bezugssystem ETRS (European Terrestrial Reference System). In Deutschland wird das ETRS89 als Bezugssystem für die Geobasisinformation der Landesvermessung und des Liegenschaftskatasters eingesetzt.

Das Referenzellipsoid des WGS84-Datums ist im ECEF-Koordinatensystem mit einer großen Halbachse $a = 6378137\text{ m}$ und der kleinen Halbachse $b = 6356752,314\text{ m}$ definiert. In der Geodäsie ist auch die Definition über die große Halbachse a und die Abplattung $f = (a - b)/a$ üblich. Zur detaillierten Beschreibung weiterer nationaler und internationaler Bezugssysteme sei auf Witte [19] und Resnik [16] verwiesen.

2.5.2 Geografische Koordinatensysteme

Zur Beschreibung der horizontalen Lage eines Punktes können neben den kartesischen Koordinaten im ECEF auch der sphärische oder ellipsoidische Winkel angegeben werden. Die geografischen Koordinaten werden als Winkel angegeben und folgendermaßen bezeichnet (Tabelle 1):

Tabelle 1: Bezeichnung der Winkel für Kugel- und Ellipsoid-Koordinatensysteme

	Kugel	Ellipsoid
Geografische Länge	λ	L
Geografische Breite	ϕ	B

Die geografische Länge eines Punktes entspricht dem Winkel zwischen der Ebene durch den Nullmeridian (XZ-Ebene, z.B. Greenwich) und der Meridianebene des Punktes. Die geografische Breite beschreibt den Winkel zwischen der Flächennormale an dem Punkt und der Äquatorebene (Abb. 14). Der Krümmungsunterschied zwischen Kugel und Ellipsoid hat einen großen Einfluss auf die geografischen Koordinaten.

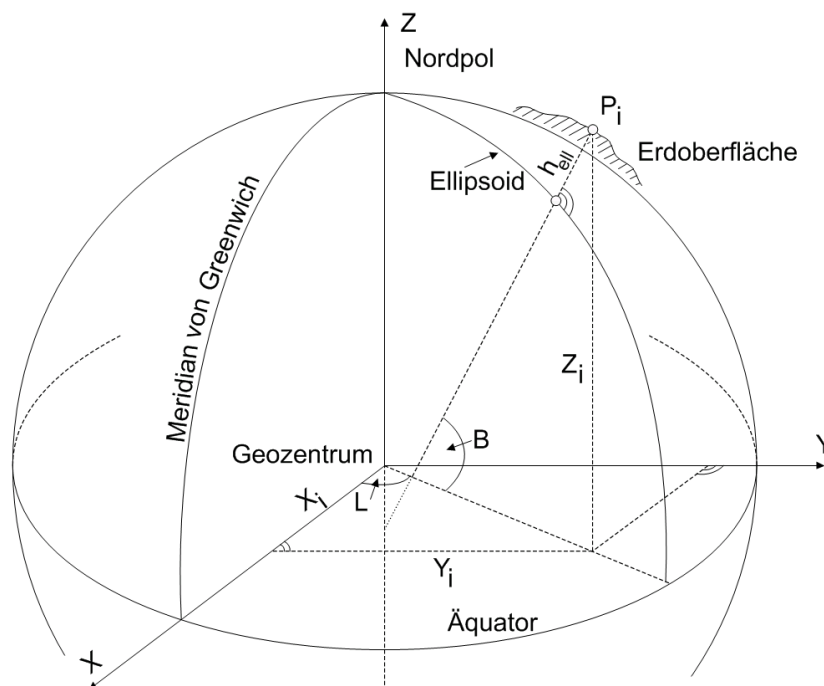


Abb. 14: Dreidimensionale kartesische Koordinaten (X,Y,Z), geografische Koordinaten (B,L) und ellipsoidische Höhe (h_{ell}) eines Punktes P_i auf der Erdoberfläche [19]

Die Höhe des Punktes wird separat betrachtet. Es kann in einem standardisierten Höhensystem (z.B. NN oder NHN für Deutschland) oder als der senkrechte Abstand des Punktes zu einer Kugel- bzw. Ellipsoidoberfläche angegeben werden.

2.5.3 Höhendefinition

Eine dreidimensionale Koordinate in einem geozentrischen Koordinatensystem wie dem ECEF beschreibt eindeutig die Position eines Punktes. Die Koordinaten sind jedoch wenig anschaulich. Im vorangegangenen Abschnitt wird die horizontale Lage eines Punktes auf einer Ersatzfläche der Erdfigur durch die Richtungswinkel der geografischen Länge und Breite zweidimensional beschrieben. Eine dreidimensionale Position entsteht durch eine Höhenangabe als dritten Parameter. Für Vermessungsaufgaben gilt in Deutschland das Deutsche Haupthöhennetz 1992 (DHHN92). Die definierte Höhe wird als Normalhöhe (H_N) oder als Höhe über der Normalhöhennull-Fläche (NHN-Fläche) bezeichnet. Als Höhenbezugsfläche wird ein Quasigeoid gewählt, dessen Höhenbezugspunkt (Nullpunkt) durch den Pegel Amsterdam NAP (Normaal Amsterdams Peil) verläuft. Durch maschenartig angeordnete Nivellementpunkte gibt es ein Netz von Höhenfestpunkten, die durch Höhenbolzen an Gebäuden oder Felsen vermarktet sind. Deren Lage und Höhe ist in Katasterämtern dokumentiert [19]. In anderen Ländern werden ähnliche Höhennetze verwendet.

Die ellipsoidische Höhe beschreibt den senkrechten Abstand eines Punktes von der Oberfläche eines Referenzellipsoiden. Bei GNSS-Messungen wird bevorzugt der Referenzellipsoid des WGS84-Datums verwendet. Die Normalhöhe und die elliptische Höhe lassen sich ineinander umrechnen.

2.5.4 Geodätische Abbildungen

Zur Abbildung der Erdoberfläche auf einer für die Lagemessung definierten Ersatzfläche werden die räumlichen, kartesischen oder ellipsoidischen bzw. sphärischen Koordinaten in ebene Koordinaten umgewandelt. Als dritte Dimension wird die Höhe in einem auf das Geoid bzw. Quasigeoid bezogenem Höhensystem definiert. Bei dieser geodätischen Abbildung werden, im Gegensatz zu kartografischen Abbildungen, lediglich kleine Teile der Erdoberfläche dargestellt, um Abbildungsverzerrungen möglichst gering zu halten. Das in Deutschland häufigste geodätische Abbildungssystem ist das Gauß-Krüger-Koordinatensystem (GK-Abbildung), das zunehmend durch die „Universale Transverse Mercatorprojektion“ (UTM-Abbildung) ersetzt wird [19].

2.5.5 Lokale kartesische Koordinatensysteme

Für praktische Vermessungsarbeiten ist es vorteilhaft, über dem Messgebiet ein lokales zweidimensionales, horizontal ausgerichtetes kartesisches Koordinatensystem zu definieren. Die Kompassrichtung ist für das Koordinatensystem nicht relevant. Von einem Startpunkt mit einer frei gewählten Koordinate ausgehend werden durch

Richtungs-, Entfernungs- und Positionsmessungen neue Messpunkte (Neupunkte) bestimmt. Während der Messkampagne werden neben den Neupunkten auch Anschlusspunkte vermessen, deren Koordinaten in einem Bezugssystem bekannt sind. Mit der Ausgleichsrechnung [20] werden aus den Mehrfachmessungen der Mess- und Anschlusspunkte gemittelte Koordinaten in dem lokalen kartesischen Koordinatensystem sowie statistische Parameter zur Genauigkeit der Messungen ermittelt. Durch die Ähnlichkeitstransformation [20] werden die Koordinaten der Neupunkte aus dem lokalen Koordinatensystem in das Koordinatensystem eines Bezugssystems konvertiert. Die Höhe wird separat berechnet.

Zur Darstellung eines Messgebietes in einem lokalen kartesischen Koordinatensystem definiert man ein horizontal nach Norden ausgerichtetes kartesisches Koordinatensystem. In der Navigation wird diese Konfiguration als NED-Koordinatensystem (North-East-Down) bezeichnet. Dessen X-Achse ist nach Norden und dessen Y-Achse ist nach Osten ausgerichtet. Da es sich um ein Rechtssystem handelt, ergibt sich die Z-Richtung nach unten. Sind Lage und Ausrichtung dieses Koordinatensystems zu einem Bezugssystem bekannt, dann sind durch Koordinatentransformation die Koordinaten des lokalen Koordinatensystems und die des Bezugssystems ineinander umrechenbar.

Es ist in der Geodäsie üblich, lokale Koordinatensysteme mit der X-Achse nach oben und der Y-Achse nach rechts darzustellen. Darin wird ein Richtungswinkel t_1^2 von der positiven X-Achse ausgehend im Uhrzeigersinn (zur positiven Y-Achse zeigend) positiv definiert (Abb. 15).

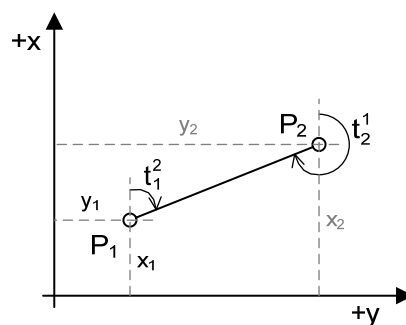


Abb. 15: Lokales kartesisches Koordinatensystem

Lokale kartesische Koordinatensysteme sind eben und berücksichtigen nicht die Erdkrümmung. Im Umkreis weniger Kilometer ist der Einfluss der Erdkrümmung jedoch vernachlässigbar.

2.5.6 Koordinatensysteme entlang von Verkehrswegen (Kilometrierung)

Verkehrswege sind langgezogene, linienförmige Bauobjekte, deren Verlauf durch Haupt- und Nebenachsen mathematisch beschrieben werden. Die Hauptachse von ein- oder mehrgleisigen Eisenbahnstrecken (Trassen) ist in der Mitte des Gesamtquerschnittes definiert. Der Verlauf eines Gleises beschreibt dessen Gleisachse, die in der Horizontalen als Längshalbierende der Spurweite definiert ist.

Der horizontale Verlauf der Achse wird in einem Lageplan (Grundriss) durch eine Aneinanderreihung von Trassierungselementen (Geraden, Bogen und Übergangsbogen) zusammengesetzt. Der vertikale Verlauf wird in einem Höhenplan (Aufriss) als Gradienten durch Geraden unterschiedlicher Steigung definiert. Ein kontinuierlicher Höhenverlauf wird durch Abrundungen mit quadratischen Parabeln an den Geraden-schnittpunkten (Tangentenschnitte) erzeugt. Die Lagekoordinaten der Hauptachse lassen sich in das Koordinatensystem einer geodätischen Abbildung (Abschnitt 2.5.4) transformieren.

Die Position auf einer Hauptachse wird als Stationierung oder Kilometrierung durch eine formatierte, eindimensionale Länge (z.B. für 12345,678 m \rightarrow km 12+345,67) angegeben. Die Kilometrierung ist als eindimensionale Länge der horizontalen Abwicklung einer Achse von einem Nullpunkt aus definiert. Die Kombination aus einer Streckennummer und einer Kilometrierung bezeichnet eine Position im Eisenbahnnetz eindeutig. Die Position von Objekten, die sich seitlich der Achse befinden, werden durch einen Kilometrierungspunkt (Lotfußpunkt) und einen senkrecht dazu definierten horizontalen Querabstand (in Stationierungsrichtung nach rechts positiv) beschrieben. Der seitliche Höhenunterschied wird relativ zur Höhe des Lotfußpunktes angegeben.

In dieser Arbeit wird eine Gleiskurve als eine Raumkurve definiert, die sich aus dem horizontalen Verlauf einer Gleisachse und dem vertikalen Verlauf des Gradienten zusammensetzt. Die Ausrichtung eines Koordinatensystems an einem Punkt auf der Gleiskurve ist definiert durch eine in tangentialer Richtung zeigende X-Achse, eine nach rechts zeigende Y-Achse mit einem Überhöhungswinkel zur Horizontalen und einer sich aus dem Rechtssystem ergebenden, nach unten zeigenden Z-Achse. Eine Trajektorie beschreibt den örtlichen und zeitlichen Verlauf eines Merkmals auf einer Raumkurve.

2.6 Satellitennavigation

Allgemein fasst Navigation die eigene Ortsbestimmung (Ortung), die Wegfindung zu einem Ziel und die Führung (eines Fahrzeuges) an das Ziel zusammen. Als Basis der Ortsbestimmung dienen die im vorangegangenen Abschnitt eingeführten Koordinatensysteme.

Im Unterschied zu Messpunkten in der Geodäsie hat ein Fahrzeug eine geometrische Ausdehnung und bewegt sich durch seine Umgebung. Daraus ergeben sich zu den bisher eingeführten geodätischen Grundlagen notwendige Erweiterungen. Zur Beschreibung fahrzeug- oder körperfester Positionen wird ein am Fahrzeugkörper befestigtes Koordinatensystem definiert. Die Bewegung eines Fahrzeuges kann man dann so interpretieren, dass sich das körperfeste Fahrzeugkoordinatensystem in einem erdfesten geodätischen Umgebungs-/Bezugskoordinatensystem bewegt. Ist die Position und die Orientierung des körperfesten Koordinatensystems im geodätischen Umgebungskoordinatensystem bekannt, dann können auch die im körperfesten Koordinatensystem definierten Positionen durch Koordinatentransformation in ein erdfestes geodätisches Koordinatensystem umgerechnet werden. Richtungen und abgeleitete Größen, wie Geschwindigkeiten und Beschleunigungen, sind als Vektoren in den Koordinatensystemen darstellbar. Als ein Messverfahren zur Ortsbestimmung wird im Folgenden die Satellitennavigation beschrieben.

2.6.1 Technischer Aufbau von Satellitennavigationssystemen

Ein globales Satellitennavigationssystem (GNSS, Global Navigation Satellite System) ist ein auf Satelliten basierendes System zur Positionsbestimmung. Verschiedene Länder besitzen ein eigenes GNSS-System mit leicht unterschiedlichen Merkmalen. Diese Arbeit bezieht sich auf das amerikanische NAVSTAR-GPS und das europäische Galileo-System. Da das Galileo-System noch nicht nutzbar ist, beziehen sich die praktischen Ausführungen nur auf das GPS-System.

Alle GNSS-Systeme bestehen aus drei Hauptsegmenten:

Das Weltraumsegment (engl: space segment) beschreibt die Satelliten, die sich in Umlaufbahnen um die Erde bewegen. Die Umlaufbahnen werden als Kepler-Bahnen mit Bahnabweichungen beschrieben. Die Satelliten bewegen sich auf einem mittleren erdnahen Orbit (MEO, medium altitude earth orbit) in einer Bahnhöhe von rund 20200 km. Die Umlaufzeit auf einer solchen Bahn beträgt rund 12 Stunden. Die Satelliten sind auf mehrere Bahnebenen verteilt, die zueinander geneigt sind.

Das Kontrollsegment (engl: control segment) hat die Aufgabe, den Zustand des Weltraumsegmentes zu überwachen und gegebenenfalls zu korrigieren. Es besteht aus

passiven Monitorstationen und einer Hauptkontrollstation mit Bodensendestation [21]. Die Monitorstationen sind über die Erde verteilt, empfangen die Satellitensignale und leiten sie an die Hauptkontrollstation weiter. In der Hauptkontrollstation werden die aktuellen Bahnparameter mit Bahnabweichungen (Ephemeriden) und Uhrenabweichungen von jedem Satelliten berechnet. Die Parameter werden über die Bodensendestation zu den Satelliten übertragen und von den Satelliten dann an das Benutzersegment ausgesendet.

Das Benutzersegment (engl: user segment) beschreibt die Empfänger, mit denen Benutzer ihre Position bestimmen können. Die Empfänger bestehen meist aus einer Antenne und einer Elektronik. Die ausgegebene Position entspricht dabei der Position der Antenne. Die Elektronik besteht aus einem Hochfrequenzteil, der das empfangene Signal der Antenne vorverarbeitet. In einem zweiten Hochfrequenzteil werden die Signale der Satelliten in einzelnen Kanälen erkannt, nachgeführt und die Daten eingelesen. Auf einem Mikrocontroller können dann die Berechnung der Position und weiterer Signale erfolgen.

GPS-Satelliten senden ein für zivile Anwendungen nutzbares Signal auf dem L1-Band (Trägerfrequenz $f_{L1} = 1575,420 \text{ MHz}$) und ein verschlüsseltes militärisch genutztes Signal auf dem L2-Band (Trägerfrequenz $f_{L2} = 1227,600 \text{ MHz}$) aus. Zur Vollständigkeit sei das L5-Band für das GPS-System erwähnt. GNSS-Systeme benutzen weitere Frequenzbänder. Das zivile L1-Signal wird durch einen C/A-Code kodiert. Durch ein CDMA-Modulationsverfahren können alle GNSS-Satelliten gleichzeitig auf diesem Frequenzband senden. Auf dem zivilen Signal werden unter anderem die Bahndaten (Ephemeriden) und die Uhrzeit des Satelliten übertragen.

Die Positionsbestimmung erfolgt durch Abstandsmessung zwischen dem Empfänger und den Satelliten. Die absoluten Positionen der Satelliten sind dem Empfänger durch die Ephemeriden zu jedem Zeitpunkt bekannt. Alle Positionen des GPS-Systems, inklusive Ephemeriden, beziehen sich auf das geodätische Bezugssystem WGS84 (siehe Abschnitt 2.5). Mit einem mathematischen Verfahren (Positionslösung, siehe [22] S. 269ff) werden dreidimensionale, absolute Positionsinformationen und Geschwindigkeitsvektoren im Empfänger berechnet. Mit Koppelnavigation lässt sich die Positionsgenauigkeit, die Verfügbarkeit und die Integrität einer Positionslösung durch die Nutzung weiterer Sensoren z.B. Inertialsensorik (IMU, Inertial Measurement Unit) verbessern. Hierzu sei auf die Fachliteratur [22 bis 25] verwiesen. Abschnitt 5.13 beschreibt die grundlegenden geometrischen und technischen Eigenschaften zur Satellitennavigation.

2.6.2 Satellitenbahnen und Bahnelemente

GNSS-Satelliten bewegen sich als erdnahe künstliche Objekte auf einer Erdumlaufbahn (Orbit). Der Orbit lässt sich als eine Ellipse aus den Newton'schen Bewegungsgesetzen und den Kepler'schen Gesetzen im Schwerfeld (Zweikörperproblem) herleiten. Zur Beschreibung des Orbits (Abb. 16) werden charakteristische Punkte und Parameter der Ellipsendefinition genutzt.

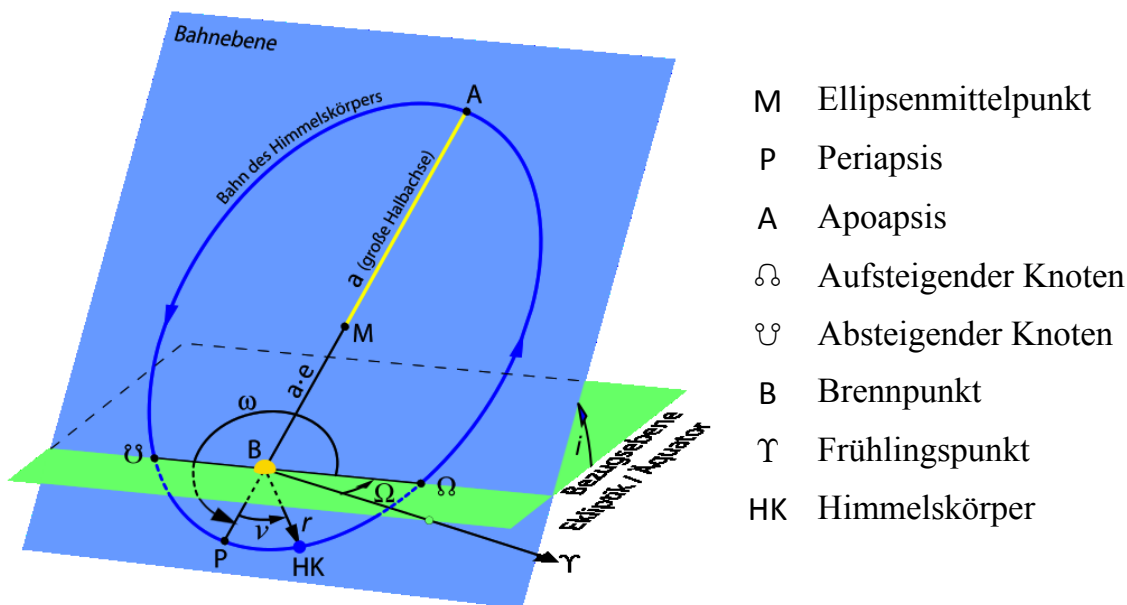


Abb. 16: Geometrische Beschreibung einer idealen Satellitenbahn als Ellipse [26]

Die große Halbachse a bestimmt die Bahngröße. Die numerische Exzentrizität e beschreibt die Bahnform. Die Inklination i ist der Winkel der Bahnebene zur Bezugsebene. Im Fall der GNSS-Satelliten ist die Bezugsebene die Äquatorebene. Der Winkel des aufsteigenden Knotens Ω (Rektaszension des Knotens) ist der Winkel zwischen dem Frühlingspunkt γ und dem aufsteigenden Knoten Ω in der Bezugsebene, vom Brennpunkt aus betrachtet. Das Argument der Periapsis ω ist der Winkel (in der Bahnebene, vom Brennpunkt aus) vom aufsteigenden Knoten Ω zur Periapsis P.

Die Inklination i , der Winkel des aufsteigenden Knotens Ω und das Argument der Periapsis ω beschreiben die Lage der Ellipse. Die Epoche t legt mit dem Zeitpunkt des Periapsisdurchgangs die Position des Objektes auf der Bahnkurve fest. Die Umlaufzeit P_t ergibt sich aus den Kepler-Gleichungen und wird hier nicht als Bahnelement angegeben, da die Masse des Satelliten gegenüber der Masse der Erde vernachlässigbar ist. Von diesen Größen lassen sich weitere Parameter ableiten:

Die mittlere Anomalie M beschreibt den Winkel zwischen der Periapsis und einem virtuellen Objekt, das sich mit gleichförmiger Geschwindigkeit (auf einer Kreisbahn)

um den Brennpunkt bewegt. Auf elliptischen Umlaufbahnen bewegen sich Objekte durch die Erhaltung des Drehimpulses unterschiedlich schnell. Die sogenannte mittlere Bewegung n gibt die Winkelgeschwindigkeit eines virtuellen Objektes auf einem virtuellen Hilfskreis an. Sie wird gemessen, indem man die Umlaufzeit T für eine Umrundung um der Erde misst und auf eine Umdrehung bezieht. Die mittlere Bewegung n kann auch aus der mittleren Anomalie M , der großen Halbachse a und der Gravitationskonstante G berechnet werden:

$$n = \frac{2\pi}{T} = \sqrt{G \cdot \frac{M}{a^3}} \quad (1)$$

Zur Beschreibung einer Ellipse im Raum benötigt man sechs Parameter. Sie beziehen sich auf den Anfang einer Epoche. Das zugrunde liegende kartesische Koordinatensystem wird durch das GNSS-System bestimmt. GPS nutzt das ECEF-Koordinatensystem des WGS84-Datums.

Die Bahnelemente werden in verschiedenen Fachgebieten in unterschiedlicher Reihenfolge angegeben. Klassische Bahnelemente werden in der Form $(p, e, i, \Omega, \omega, t)$ angegeben. Für Satellitennavigation verwendet man das NASA/NORAD „Two Line Elements“-Format (TLE) mit folgender Reihenfolge $(n, e, i, \Omega, \omega, M)$.

Die reale Bewegung eines Satelliten auf seiner Umlaufbahn setzt sich aus der gerade beschriebenen idealen elliptischen Umlaufbahn und Abweichungen von der idealen Umlaufbahn zusammen. Die Bahnstörungen werden durch zusätzliche Korrekturparameter beschrieben. Aus diesen Parametern lässt sich die aktuelle Position des Satelliten berechnen. Das Berechnungsverfahren ist in Abschnitt 5.13.1 beschrieben.

2.6.3 Zeitdefinitionen

Das Uhrzeitformat des GPS-Systems besteht aus der Anzahl der Wochen (Wn , Week Number) seit dem 06.01.1980 und in einer zweiten Variable, der Anzahl der Sekunden seit Wochenbeginn (TOW , Time of Week). Eine GPS-Woche beginnt am Sonntag 0:00:00 Uhr. Die Nummer des Wochentages einer GPS-Woche wird von Sonntag als dem nullten Wochentag (0,1,2,...) an gezählt. Das Uhrzeitformat des Galileo-Systems ist formal gleich aufgebaut, jedoch wird die Anzahl der Wochen ab dem 22.08.1999 gezählt. Beide Uhrzeitformate lassen sich in die koordinierte Weltzeit UTC umrechnen. Die GPS-Uhrzeit wird kontinuierlich gezählt. Die Uhrzeit der koordinierten Weltzeit ist an die Erdrotation gekoppelt und wird in unregelmäßigen Abständen um eine Schaltsekunde verlängert.

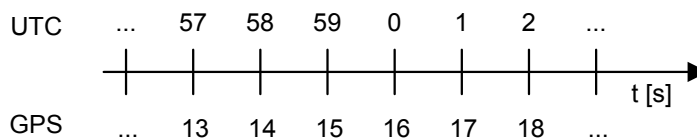


Abb. 17: Zusammenhang von UTC-Zeit mit 16 Schaltsekunden und GPS-Zeit auf Zeitstrahl

Daraus ergibt sich, dass der angezeigte Zeitwert der GPS-Zeit um eine Anzahl von Schaltsekunden größer ist (Abb. 17) als der angezeigte Zeitwert der koordinierten Weltzeit ($\text{GPS} = \text{UTC} + \text{Schaltsekunden}$).

2.6.4 Auswertung der Satellitensignale im Empfänger

Das Grundprinzip der Satellitennavigation basiert auf der Entfernungsmessung eines Empfängers zu mehreren Satelliten, wobei die Position der Satelliten dem Empfänger bekannt ist. Als Entfernung wird der geometrische Abstand der Satellitenposition zur Empfängerposition definiert (wahrer Abstand, engl: Truerange). Der Abstand kann als Radius einer Entfernungskugel um den Satelliten interpretiert werden. Aus der Schnittlinie zweier Entfernungskugeln (deren Mittelpunkte weniger als die Summe der Abstandsradien entfernt sind) ergibt sich als geometrischer Ort ein Kreis. Aus dem Schnittpunkt dreier Entfernungskugeln ergeben sich bei idealen mathematischen Bedingungen zwei Schnittpunkte. Ein Schnittpunkt ist die gesuchte Empfängerposition, und der zweite Schnittpunkt kann durch seine Entfernung von der Erdoberfläche ausgeschlossen werden. Um eine dreidimensionale Position zu bestimmen, sind geometrisch mindestens drei Satelliten notwendig. Meist werden mehr als vier Satelliten empfangen und die Entfernungsmessungen sind mit Messfehlern überlagert, sodass die Lösung der Ortungsaufgabe nicht eindeutig oder mehrdeutig ist. Diese Mehrdeutigkeit lässt sich durch verschiedene mathematische Verfahren [22, 23] lösen. Gleichzeitig wird die Empfängeruhr sehr genau auf die GNSS-Systemzeit synchronisiert, wodurch sich ein GNSS-Empfänger auch als Zeitnormal für örtlich verteilte Messsysteme (z.B. auf verschiedenen Schienenfahrzeugen) eignet.

Die Abstandsmessung zwischen Satellit und Empfänger wird technisch durch eine Laufzeitmessung umgesetzt. Dabei wird der Anfangszeitpunkt einer Satellitenbotschaft t_{sv} in der Botschaft selbst mitgesendet. Der Empfänger kann aus dem Empfangszeitpunkt t_e seiner lokalen, auf die GNSS-Zeit abgeglichenen, Uhrzeit die Differenzzeit ermitteln. Die Differenzzeit wird als die Signallaufzeit des Satellitensignals zum Empfänger interpretiert.

Mit der Annahme, dass sich die elektromagnetische Welle des Satellitensignals mit Vakuumlichtgeschwindigkeit c bewegt, lässt sich aus der Signallaufzeit ein Pseudoabstand (Pseudorange, R) berechnen.

$$R = (t_e - t_{sv}) \cdot c \quad (2)$$

Der gemessene Pseudoabstand ist durch systematische und stochastische Störungen verfälscht. Die Haupteinflussgrößen sind bekannt und werden zurückgerechnet. Die verbleibenden Störungen werden durch mathematische Verfahren geschätzt.

Um die Genauigkeit der Abstandsmessung zu verbessern, kann der Phasenwinkel der Trägerphase ausgewertet werden (Trägerphasenlösung). Aus der Wellenlänge der elektromagnetischen Welle lässt sich über den Abstand zwischen Empfänger und Satelliten die Anzahl der vollständigen Wellenlängen berechnen. Aus der Phase der letzten unvollständigen Wellenlänge und der Anzahl der vollständigen Wellenlängen lässt sich ebenfalls der Abstand zum Satellit messen. Die Schwierigkeit dieses Verfahrens besteht darin, die richtige Anzahl vollständiger Wellenlängen zu ermitteln sowie das Satellitensignal mit seiner Trägerphase kontinuierlich zu verfolgen.

3 Stand der Forschung im Bahnbereich

Der Eisenbahnbereich ist traditionell in Infrastruktur und Rollmaterial (Schienenfahrzeuge) getrennt. In beiden Teilgebieten haben sich verschiedene Simulationswerkzeuge mit unterschiedlichem Fokus entwickelt. Abschnitt 3.1 stellt die Simulationsmethoden der beiden Bereiche im Überblick vor. Auf die Simulation des Zugleit- und Sicherungssystems ERTMS/ETCS wird gesondert eingegangen.

Die intensiven Forschungsaktivitäten zur Nutzung von Satellitennavigationssystemen im Bahnbereich werden in Abschnitt 3.2 diskutiert. Dieser Abschnitt beschreibt detailliert den aktuellen Entwicklungsstand GNSS-erweiterter Odometrie und geht auf die zwei Forschungsprojekte Galileo-above und SiPoS-Rail ein.

Die für wissenschaftliche Versuche nutzbaren Testgleise – von Rangiergleisen, Testgleisen und Testringen bis zum öffentlichen Gleisnetz – werden in Abschnitt 3.3 am Beispiel der von dem Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ befahrenen Testgebiete allgemein vorgestellt.

Abschnitt 3.4 gibt einen Überblick über Sonderfahrzeuge des Schienenverkehrs. Dabei wird ein besonderer Fokus auf wissenschaftliche Versuchsfahrzeuge gelegt.

3.1 Simulationen im Bahnbereich

Die vorgestellten Simulationen in diesem Abschnitt sollen, wie im Eisenbahnbereich üblich, nach ihrem Einsatzgebiet unterschieden werden. So werden Infrastruktur-simulationen (Abschnitt 3.1.1), Schienenfahrzeugsimulationen (Abschnitt 3.1.2) und Zugsicherungssimulationen (Abschnitt 3.1.3) separat behandelt. Abschnitt 3.1.4 gibt einen Überblick über die Simulationsmöglichkeiten von Satellitennavigation.

3.1.1 Schienenverkehr-Infrastruktur-Simulationen

Eisenbahnbetriebssimulationen zur Untersuchung von Streckennetzkapazitäten und Fahrplänen werden grundlegend in makroskopische und mikroskopische Betriebs-simulationen unterteilt.

Makroskopische Betriebssimulationen dienen der Kapazitätsanalyse von Streckennetzen mit einem wirtschaftlichen und strategischen Fokus, um Verkehrsnachfrage, Produktionsanforderungen und Netzinfrastruktur in einem Modell ähnlichen Detaillierungsgrades abzubilden. Das Gleisnetz wird als Netzgraph mit Knoten und Kanten erstellt. Die Knoten repräsentieren Betriebsstellen, und die Kanten entsprechen

Gleisverbindungen zwischen den Betriebsstellen. Die Züge werden mit den Eigenschaften der grundlegenden Zugkategorien als Personen- und Güterzüge im Nah- und Fernverkehr modelliert. Die Simulation wird als Zeitschrittsimulation im Sekunden- bis Minutentakt oder ereignisbasiert durchgeführt. Als Ergebnis der Simulation wird die Streckenbelastung durch Kennzahlen wie Belegungsgrad, Streckenkapazität und mittlere Pufferzeiten je Kante charakterisiert. Daraus können nachfragegerechte Verkehrsverbindungen, Taktzeiten, optimierte Laufwege gesucht sowie Kapazitätsengpässe oder freie Kapazitäten ermittelt werden [27, 28].

In mikroskopischen Betriebssimulationen wird die Infrastruktur im Detail modelliert, um einen realistischen Betriebsablauf mit vielen technischen und organisatorischen Randbedingungen zu untersuchen. Der Netzgraph wird mit den funktionalen technischen Grundeigenschaften der Infrastruktur modelliert. Die Knoten bilden alle ortsfesten Infrastrukturelemente wie Signalanlagen, Zugsicherungselemente, Informationstafeln, Weichen und Haltepunkte ab. Die Kanten werden mit ihren Eigenschaften, z.B. Länge, Überhöhung, Gradient und zulässige Höchstgeschwindigkeit (für verschiedene Zugkategorien) modelliert. Das Rollmaterial wird als Objekt mit den jeweils für die technische Infrastruktur und den Betriebsablauf relevanten Eigenschaften (z.B. Länge, Gewicht, Zugkraft (abhängig von der Geschwindigkeit), Höchstgeschwindigkeit, Fahrwiderstände, Ausstattung, ...) modelliert. Ein Fahrplan beschreibt die geplante Bewegung der Schienenfahrzeuge [29]. In einer synchronen Simulation mit einer Taktzeit im meist einstelligen Sekundenbereich werden die Zustände der Infrastruktur und des Rollmaterials berechnet. In weiteren Auswertungsschritten lassen sich anhand der Simulationsdaten Rückschlüsse auf Fahrzeiten, Streckenbelegung, minimale Zugfolgezeiten sowie Stabilität, Qualität und Machbarkeit von Fahrplänen ziehen. Die Auswirkungen von Langsamfahrstellen, die Verhaltensanalyse zukünftiger Schienenfahrzeuge, Veränderungen im Streckennetz [30], Änderungen der Signal- und Zugsicherungssysteme und grundsätzlich das Verhalten des gesamten Bahnsystems bei Störungen lassen sich vorausberechnen [31]. Mit Optimierungsverfahren können robuste und effektive Konfigurationen gefunden werden [32]. Neben vielen betriebsinternen und proprietären Datenaustauschformaten hat sich das herstellerunabhängige XML-basierte Datenformat railML [33] als Datenaustauschformat für Infrastruktur-, Rollmaterial- und Fahrplandaten etabliert.

Intensive Entwicklungsarbeit findet in den vergangenen Jahren zur durchgängigen und vollständigen Digitalisierung der Infrastruktur-Planungsprozesse statt [34, 35]. Aufbauend auf vollständigen digitalen Planungs- und Bestandsdaten [36] und standardisierten Schnittstellen kann die mikroskopische Betriebssimulation stärker in die Planungs- und Optimierungsprozesse eingebunden werden.

Weitere Simulationsanwendungen im Infrastrukturbereich sind im Folgenden kurz erwähnt:

Die Simulation von technischen Einrichtungen, z.B. Stellwerken, ist in vielen Bereichen des Eisenbahnsektors weit verbreitet. Die operativen Arbeitsplätze von Mitarbeitern werden in Simulatoren für Personalschulungen [37], Demonstrationen [38] und zur wissenschaftlichen Untersuchung des menschlichen Verhaltens und zur Arbeitsplatzergonomie [39] nachgebildet. Die angezeigten Informationen und Bedienhandlungen werden von einer Echtzeitsimulation als Ersatz des realen Systems verarbeitet, sodass ein realistisches Verhalten der Systeme bei dem Benutzer entsteht.

In der Entwicklung [40 bis 43] von Infrastruktursystemen nutzt man Systemtests [44, 45] zum Nachweis der Funktionalität. Hierbei wird die Software in einer Software-in-the-Loop-Architektur (SiL) mit einer Umgebungs- oder Testsoftware gekoppelt. Vollständige Geräte oder Systeme lassen sich in einer Hardware-in-the-Loop-Umgebung auf deren Funktionalität, Eigenschaften und Reaktion auf Störungen oder Fehlersituationen untersuchen.

3.1.2 Test und Simulation von Schienenfahrzeugen

Zur Untersuchung von Fahrzeugeigenschaften und zum Nachweis von Funktion, Lebensdauer, Kompatibilität und Konformität werden Schienenfahrzeuge und deren Bauteile auf Prüfständen getestet. Einzelne Bauteile werden auf Komponentenprüfständen oder im Rahmen der Inbetriebnahme von Schienenfahrzeugen analysiert. Vollständige Schienenfahrzeuge werden auf Testfahrten in Testzentren oder auf dem öffentlichen Streckennetz untersucht. Dies ist jedoch sehr aufwendig und teuer. Durch Automatisierung der Testabläufe [46] lassen sich die Prüfstände rationeller verwenden. Sehr lange Testprozeduren aus umfangreichen Testspezifikationen, z.B. bei Zugsicherungssystemen [6], werden nach der Konfiguration automatisiert durchgeführt [47].

Eine weitere Möglichkeit der Untersuchung von Systemeigenschaften besteht in der Simulation der entwickelten Fahrzeugbauteile oder des gesamten Fahrzeuges. Schienenfahrzeugsimulationen konzentrieren sich meist auf ein einzelnes Fahrzeug oder einen Zug. Die auf das Fahrzeug wirkenden Belastungen werden durch Signalgeneratoren oder durch Streckeneigenschaften wie Krümmung, Überhöhung, Schienenqualität und Geschwindigkeitsprofil aufgeprägt.

Mechanische Schienenfahrzeugstruktur und deren Dynamik werden häufig in Mehrkörpersimulationsmodellen [48] abgebildet. Für viele Anwendungen lassen sich die Körper als gekoppelte Starrkörper annehmen, die sich relativ zueinander bewegen und Kräfte aufeinander ausüben. Bei diesen Systemen nimmt man nur die Verbindungselemente zwischen den Körpern als elastisch an. Eine Erweiterung des

Starrkörpermodells ist die Annahme von flexiblen Körpermodellen, bei denen die Masse und Elastizität kontinuierlich über den Körper verteilt sind. Inhomogen im Körper verteilte Spannungen und Verformungen werden mit Finite-Elemente-Methoden (FEM) analysiert [49]. Die Besonderheit von realistischen Schienenfahrzeugmodellen besteht in einem sehr komplexen Rad-Schiene-Kontaktmodell [50, 51].

In Mehrkörpersimulationen betrachtet man die mechanischen Eigenschaften von Fahrzeugteilen, z.B. Wagenkasten und Fahrwerke, in Parameterstudien und Stabilitätsuntersuchungen. Zur fahrdynamischen Auslegung und Funktionsnachweis werden Mehrkörpersimulationen intensiv eingesetzt [52]. Untersuchungen zur Entgleisungssicherheit wurden von Hermanns [53] anhand von Mehrkörpersimulationen in SIMPACK und der Validierung an einem Rollenprüfstand durchgeführt. Abdelfattah [54] analysiert und entwickelt Losradfahrwerkskonzepte unter Nutzung von Mehrkörpersimulation (SIMPACK), FEM (ANSYS) und MATLAB/Simulink.

In energieflussbasierten Simulationen werden Fahrzeugtechnikkomponenten bei deren Auslegung in betriebsnahen Szenarien analysiert. Solche Simulationen werden insbesondere für Bremssysteme [55], Klimatisierungs- und Heizungssysteme, elektrische Anlagen, Antrieb und Antriebsstrang [56, 57] und Neigetechnik [58] eingesetzt. Eine Gesamtfahrzeugsimulation von Fahrzeugmechanik und Fahrzeugtechnik stellen Zhang et al. [59] vor.

Die Funktionalität von Steuergeräten wird durch Hardware-in-the-Loop (HiL) oder Software-in-the-Loop- (SiL-) Prüfständen untersucht. Dabei werden ein Steuergerät oder ein Algorithmus mit einer für das Steuergerät angepassten Umgebungssimulation verbunden, die realitätsnahe Schnittstelleneigenschaften erzeugt [58]. Je nach Funktionalität und Schnittstelle des technischen Systems simuliert man die Umgebung durch eine Infrastruktur- oder Schienenfahrzeugsimulation oder durch eine kombinierte Simulation.

Fahrzeugsimulatoren werden zur Ausbildung und Schulung von Triebfahrzeugführern eingesetzt [60]. Verschiedene Hersteller bieten Simulatoren mit unterschiedlicher Realitätsnähe an [61], die den Fahrerstand, das Sichtfeld und die Fahrzeugreaktion simulieren. Zur Verbesserung der Arbeitsplatzergonomie des Triebfahrzeugführers führt das DLR (Institut für Verkehrssystemtechnik in Braunschweig) Untersuchungen am Fahrsimulator RailSET durch [12, 38].

3.1.3 Simulation von ERTMS/ETCS

ERTMS als Zugleit- und Sicherungssystem hat Verbindungen über die ETCS-Streckenzentrale zu den Infrastruktursystemen und über die ETCS-Fahrzeugausrüstung zum Triebfahrzeugführer und den Fahrzeugsystemen.

Die Hersteller von ETCS-Komponenten nutzen entwicklungs- und produktionsbegleitende Testsysteme, um die Eigenschaften der entwickelten Systeme gegenüber Anforderungen zu verifizieren. Parallel dazu gibt es unabhängige Testlabore wie das DLR RailSiTE und CEDEX, die Zertifizierungen von ETCS-Komponenten durchführen. Simulatoren werden zur Ausbildung und Schulung von Fahrdienstleitern und Stellwerkspersonals eingesetzt [61 bis 63]. Als eine weit verbreitete mikroskopische Infrastruktur-Betriebssimulation sei die Software BEST [40] erwähnt. Einen Überblick über Simulationswerkzeuge gibt Winter [3, S.122ff].

3.1.4 Simulations- und Testumgebungen für Satellitennavigation und deren Einsatz im Eisenbahnbereich

In den meisten Projekten mit Satellitennavigation werden die Versuche mit realen Tests durchgeführt. Die aufgenommenen GNSS-Rohdaten in Form von standardisierten Navigationsbotschaften [64, 65] können Auswertelgorithmen wiederholt vorgegeben werden. Dies führt zu einer praxisnahen Aussage der Systeme mit realistischen Empfangs- und Umweltbedingungen und ist gegenüber einer Simulation der Satellitennavigation im Experimentaufbau einfacher.

Für Gesamtsystemtests wird der GNSS-Empfänger durch einen GNSS-Signalgenerator mit simulierten Hochfrequenzsignalen an der Antennenschnittstelle versorgt. Die Hochfrequenzsignale werden durch Bestrahlung der GNSS-Antenne oder leitungs-basiert eingekoppelt. So ist keine Änderung des Gesamtsystems notwendig, und alle Komponenten werden getestet. Die Darstellung eines Testszenarios mit einem GNSS-Simulator (Rohde&Schwarz SMBV100A) gibt Tröster-Schmid [66]. Jedoch zielen GNSS-Signalgeneratoren eher auf die Entwicklung und Test von GNSS-Empfängern (deren Hardware und Software) ab. Satellitennavigation lässt sich als Sensorsystem anwenden, indem man einen GNSS-Signalgenerator mit einem Bewegungssimulator koppelt und eine Trajektorie (der sich bewegenden GNSS-Antenne) vorgibt. Eine Systemkonfiguration für einen echtzeitfähigen Hardware-in-the-Loop-Prüfstand mit einem GNSS-Simulator wird in [67] vorgestellt.

Im Projekt SATLOC [68] wurde eine GNSS-erweiterte Odometrie-anwendung für die Nutzung im ERTMS-System entwickelt und untersucht. Neben praktischen Messungen auf einer Regionalstrecke in Rumänien wurde eine Validierungsumgebung mit einem GNSS-Simulator (Spirent GSS6700) entwickelt. Darin wird das Gesamtsystem mit einem GNSS-Empfänger (Septentrio RX3) verschiedenen eisenbahnspezifischen Testszenarien ausgesetzt, in die Störungen und Fehler-situationen eingebaut werden. Die Antennenposition wird konstant 4 m über der Trajektorie positioniert.

Wang [69] stellt eine Trajektorien-simulation für ein Eisenbahnsystem vor, in der neben der Bewegung des Schienenfahrzeuges die Geoposition in Form von NMEA-Botschaften (GGA) erzeugt wird. Die Trasse wird auf Basis einer digitalen Karte und eines Fahrplanes generiert. Die Sichtbarkeit der Satelliten über dem künstlichen Horizont wird anhand der Ephemeriden berechnet. Die Simulation soll für GNSS-basierte Eisenbahnanwendungen und als Beispiel für die GNSS-basierte Zuglokalisierung in GNSS-basierten Zugleitsystemen genutzt werden. Das System ist in der Programmiersprache C# implementiert.

3.2 Erweiterte Odometrie und Satellitennavigation im Eisenbahnbereich

Ausgehend von dem in Abschnitt 2.4 beschriebenen konventionellen Odometrie auf einem Schienenfahrzeug gibt es intensive Forschungstätigkeit zur Nutzung des europäischen Satellitennavigationssystems Galileo als Odometriesensor für das europäischen Zugleit- und Sicherungssystem ERTMS.

3.2.1 Einführung und Definition

Als "erweiterte Odometrie" werden hier in einer unscharfen Zusammenfassung Messverfahren angesehen, die zusätzlich oder alternativ zu konventionellen Odometriesensoren (Abschnitt 2.4) neue Sensoren verwenden, z.B. Satellitennavigation, Inertialsensorik (IMU) oder Wirbelstromsensorik.

Konventionelle Odometrie erzeugt ein kontinuierliches, relatives Distanzsignal mit diskontinuierlichen, absoluten Bezugspunkten (z.B. ETCS-Eurobalisen) und ein eindimensionales Geschwindigkeitssignal. Bei der Satellitennavigation wird eine kontinuierliche, dreidimensionale Absolutposition mit Geschwindigkeitsvektor gemessen. Daraus ergeben sich viele interessante Fragestellungen, wie zwei so unterschiedliche Lokalisierungssysteme gemeinsam vorteilhaft genutzt werden können.

Durch ein Mapmatching-Verfahren können geografische Koordinaten in den bei Eisenbahnen üblichen Positionsbegriff aus Streckennummer und Kilometrierung umgerechnet werden. Diese Umrechnung ist aber durch die Positionsungenauigkeit der GNSS-Messung bei nahe nebeneinander verlaufenden Gleisen, an Weichen und Kreuzungen und mehrgleisigen Streckenabschnitten häufig nicht eindeutig. Durch Sensorfusion mit weiteren Sensoren oder Informationen werden diese Situationen mit erweiterten Auswertelgorithmen in Forschungsprojekten untersucht, z.B. mit Inertialsensorik (IMU), Wirbelstromsensorik, Laser, Balisen, erweiterte Störungskorrektur durch differenzielles GNSS, Infrastrukturinformationen aus dem Stellwerk

oder allgemein zusätzlichem Wissen [70]. Meist sieht man das sich bewegende Fahrzeug als einen starren Körper an und reduziert den Fahrzeugkörper auf einen Punkt an der Position der GNSS-Antenne. Schienenfahrzeuge verfügen jedoch als Besonderheit über zwei Drehgestelle (oder vier Radsätze), die zwei (oder vier) Kontaktpunkte zum Fahrweg bilden. Durch Krümmung und Überhöhung des Gleises ergeben sich komplexe Bewegungen eines auf dem Wagenkasten montierten GNSS-Empfängers.

3.2.2 Stand der Wissenschaft und Technik

In den vergangenen 20 Jahren wurde in einer Vielzahl von Entwicklungs- und Forschungsprojekten die Anwendung von erweiterter Odometrie untersucht. Immer stärker werden diese Verfahren auch im spurgebundenen Verkehr eingesetzt. Hierbei unterscheidet man zwischen sicherheitsrelevanten und nicht sicherheitsrelevanten Anwendungen.

Anwendungen ohne Sicherheitsverantwortung werden bereits in der betrieblichen Praxis des Eisenbahnverkehrs eingesetzt [71, 72]. Im operativen Betrieb von Schienenfahrzeugen kann der Standort eines Zuges mit weiteren Status- und Diagnosedaten in Echtzeit den Infrastruktursystemen, z.B. zur Instandhaltung oder Disposition, zur Verfügung gestellt werden. Mit diesen Daten lassen sich Fahrplanabweichungen und Fahrzeugzustand überwachen. Aus der Kenntnis der aktuellen Situation auf dem Gleisnetz ist eine effizientere Echtzeitplanung möglich.

Mit dem Wissen des Standortes eines Schienenfahrzeuges und des weiteren Strecken- und Fahrtverlaufes unterstützen Fahrerassistenzsysteme den Triebfahrzeugführer bei einer energiesparenden Fahrweise und der Pünktlichkeit. Die Laufwege, Laufzeiten, Fahrprofile, Fahrzustände und der Energieverbrauch lassen sich unabhängig von den Solldaten dokumentieren und für Betriebsprüfungen und Analysen vorhalten.

In der Instandhaltung werden Status- und Fehlermeldungen zu einem Standort auf dem Gleisnetz und der durchgeführten Zugfahrt zugeordnet. Dadurch sind die Situationen (und mögliche Verursacher) von Schadensfällen nachvollziehbar [73]. Die ereignis- und zustandsabhängige Instandhaltungsplanung der Schienenfahrzeuge und des Gleisnetzes wird durch eine verbesserte Zustandsmessung, Verschleißschätzung und genauere Ausfallwahrscheinlichkeit unterstützt [74].

Neben Triebfahrzeugen und Triebzügen werden auch Güterwagen mit Steuergeräten, GNSS-Sensoren und Mobilfunk zur Echtzeitverfolgung, Diagnose, Laufleistungskontrolle und Dokumentation der Transporteigenschaften eingesetzt. Gefahrguttransporte müssen intensiver überwacht werden.

Die vor- und nachgelagerten Prozesse des Transportvorganges von der kurz-, mittel-, und langfristigen Planung von Zugfahrten, Fahrzeug- und Personaleinsatz bis zur

Abrechnung und statistischen Analyse werden immer stärker mit automatisierten und vernetzten Infrastruktursystemen durchgeführt. In allen Bereichen der Eisenbahn sind, als ein allgemeiner Trend der vierten industriellen Revolution „Industrie 4.0“, die Digitalisierung, die Automatisierung sowie die Kombination und Verarbeitung großer Datenmengen („Big Data“) zur Angebotserweiterung und Effizienzsteigerung zu beobachten.

Ein standardisierter (elektronischer) Datenaustausch zwischen verschiedenen Unternehmen und Institutionen im Eisenbahnbereich wird durch Normen wie TSI [75], TAF-TSI, TAP-TSI, unterstützt [76].

Als ein Beispiel eines Telematiksystems mit GPS-Ortung wird von Bombardier das „*INTERFLO 50*“-System [77] mit einem „*EBI Star 1000*“-Fahrzeugsteuergerät und Infrastruktursystemen auf Basis von „*EBI Screen 1200*“ angeboten. Im Rahmen des ATLAS-Projektes [72] von Bombardier und der belgischen Staatsbahn SNCB wurde ab 2002 ein Ortungs- und Kommunikationssystem zur Verfolgung und Verwaltung von Schienenfahrzeugen aufgebaut. Das Fahrzeugsteuergerät hat eine Schnittstelle zur konventionellen Odometrie und einen GNSS-Empfänger, um Fahrzeug- und Diagnosedaten zu verorten. Die Daten werden drahtlos digital an Infrastruktursysteme übertragen und für die Echtzeit-Fahrzeugverfolgung, Fahrplaneinhaltung und Planungs-, Analyse-, Instandhaltungs- und Auswertungsprozesse weiterverarbeitet.

In Versuchs- und Messfahrzeugen werden Messdaten durch GNSS-Messungen zusätzlich georeferenziert [78, 79].

Sicherheitsrelevante Anwendungen im Schienenverkehr, die Satellitennavigation verwenden, werden meist für Zugsicherungssysteme genutzt. An der Qualifizierung von Satellitennavigation in sicherheitsrelevanten Anwendungen wird intensiv gearbeitet. Im Rahmen der Entwicklung des europäischen Satellitennavigationssystems Galileo und des europäischen Zugleit- und Sicherungssystems ERTMS sind mehrere große Forschungsprojekte durchgeführt worden (APOLO, GADEROS [80], INTEGRAIL [71], Locoloc/LOCOPROL [81], RUNE, DemoOrt [82, 83], GRAIL/GRAIL2 [84], SATLOC [85, 86], 3InSat [87], ERSAT [88], GaLoROI [89], PiLoNav [90], Galileo-above [178-181], SiPoS-Rail [91]).

In Russland wird als Erweiterung des KLUB-Zugsicherungssystems auf Basis des GLONASS-Satellitennavigationssystems das ITARUS-ATC System operativ eingesetzt [92]. In Nordamerika wird das Zugleitsystem PTC (Positive Train Control) eingeführt, welches u.a. das Satellitennavigationssystem GPS zur Positionsbestimmung verwendet. Bei der Pinzgauer Lokalbahn wird ein rechnergestütztes Zugleitsystem [93] verwendet, dass funktional an ETCS Stufe 3 angelehnt ist und eine

Fahrzeugeigenortung auf Basis von Odometriesensorik, Festdatenbalisen und Differenzial-GPS nutzt.

Auf zwei Regionalstrecke auf Sardinien (Italien) und in Rumänien werden in den Projekten SATLOC, 3InSat und ERSAT neue Komponenten für das europäische Zugleit- und Zugsicherungssystem ERTMS getestet. Mit dem Satellite Location Determination System (LDS) von Ansaldo STS wird ein alternativer ETCS-Eurobalisenempfänger (BTM) eingesetzt, der durch Satellitennavigation die Überfahrt über virtuelle Balisen erzeugt. Mit dem System soll die Anzahl der verlegten ETCS-Eurobalisen auf Regionalstrecken verringert werden. Als Augmentierungssystem für das Satellitennavigationssystem wird EGNOS eingesetzt. Neue Kommunikationswege zwischen ETCS-Streckenzentrale und ETCS-Fahrzeugausrüstung über paketbasierten 3G-Mobilfunk, Tetra-Funk oder Satellitenkommunikation werden alternativ zum bestehenden GSM-R System in einer „multi-bearer wireless TLC solution“ zusammengefasst.

Mit Wirbelstromsensorik werden Änderungen von ferromagnetischem Material entlang des Schienenweges als Intensitätssignal gemessen. Daraus lassen sich ortsfeste Elemente wie Gleisschrauben (kontinuierliche Pulse) und Weichen (charakteristischer Signalverlauf) erkennen. Durch die regelmäßige Anordnung von Gleisschrauben wird in den einzelnen Sensorelementen ein charakteristisches Frequenzsignal erzeugt, dass aus dem Leistungsdichtespektrum durch Peakerkennung vermessen werden kann. Mit zwei in einem festen Abstand installierten Sensorelementen lässt sich durch Kreuzkorrelation die Geschwindigkeit ermitteln [94].

Die optische Geschwindigkeitsmessung ist in einem Correvit-Sensor [95] umgesetzt. Ein Sensor mit diesem Messprinzip war auf dem IFS-Erprobungsträger verbaut (Anhang A.5.2) und wurde in den Projekten Galileo-above und SiPoS-Rail verwendet.

Inertialsensorik wird in Navigationsanwendungen meist als IMU-Sensoren verwendet, die aus je einem Beschleunigungssensor und Winkelgeschwindigkeitssensor in allen drei Raumrichtungen bestehen. Die integrierten Sensoren können weitere Sensoren enthalten, z.B. die Messung des Erdmagnetfeldes zur Bestimmung der Kompassrichtung. In integrierten Navigationssystemen werden IMU-Sensoren parallel mit anderen Sensoren, insbesondere Satellitennavigation, eingesetzt [23].

Das mit Abstand komplizierteste Sensorsystem ist jedoch die Satellitennavigation! Durch die Eigenschaft, unabhängig von anderen Sensoren eine absolute Geoposition messen zu können, ergeben sich mit diesem Sensorsystem viele neuartige Anwendungen. Mit einer kompakten Antenne auf dem Dach und einer Elektronik im Innenraum sind geringere Wartungskosten zu erwarten.

3.2.3 Forschungsprojekt Galileo-above

Im Rahmen des Forschungsprojektes Galileo-above (2008–2014) wurden für das europäische Satellitennavigationssystem Galileo zwei Testzentren (GATEs) für den bodengebundenen Verkehr errichtet. Das Testzentrum für den Straßenverkehr ist das automotiveGATE in Aldenhoven (nahe Aachen). Darauf aufbauend ist das hersteller-unabhängige Automobiltestzentrum „Aldenhoven Testing Center“ (ATC) entstanden. Für den Schienenverkehr ist das railGATE auf dem schon bestehende Prüf- und Validationcenter in Wildenrath entstanden. Im Teilprojekt „Initialprojekt Rail“ wurde ein Rangierer-Assistenzsystem zur Teilautomatisierung von Rangierprozessen entwickelt. Das System kann automatische Fahrbewegungen auf Basis von Satellitennavigations- oder railGATE-Ortung in einem Rangierszenario ausführen (Zielbremsung, Kuppel-bereites Positionieren an einem Güterwagen und teilautomatisierte Zugbildung durch Umsortierung von Güterwagen auf einer Flachrangieranlage). Die Testfahrten wurden mit dem Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ und Güterwagen durchgeführt.

In ähnlichen Projekten sind weitere GATE-Testzentren entstanden. Für den Luftverkehr gibt es in Braunschweig das aviationGATE und in Rostock steht das SeaGATE für die Schifffahrt. Zur Entwicklung und Test der Funktionalität des Galileo-Satellitennavigationssystems wird in Berchtesgaden das Testzentrum GATE genutzt. Allen GATE-Testzentren gemeinsam ist die Nutzung von Pseudosatelliten-sendern (Pseudoliten), die von hohen Masten oder Bergen aus die Testgelände mit Pseudosatellitensignalen bestrahlen. Spezielle GATE-Empfänger können die Pseudolitensignale auswerten und sich orten.

3.2.4 Forschungsprojekt SiPoS-Rail

In dem Forschungsprojekt SiPoS-Rail (2011–2014) wurde eine Lokalisierungsmethode für ein Schienenfahrzeug auf Basis von Satellitennavigation und ortsfesten Wegmarken entwickelt [91, 96]. Das Verfahren verbessert die Qualität und die Integrität der Positions- und Geschwindigkeitssignale eines GNSS-Empfängers.

Die entwickelte Lokalisierungseinheit hat zwei Zustände:

1. Das Schienenfahrzeug fährt über eine Wegmarke. Aus der bekannten Position der Wegmarke kann die Lokalisierungseinheit als Referenzstation die Korrekturdaten für den GNSS-Empfänger berechnen.
2. Das Schienenfahrzeug bewegt sich auf freier Strecke. Die Lokalisierungseinheit verbessert die Positions- und Geschwindigkeitssignale des GNSS-Empfängers durch die im ersten Zustand ermittelten Korrekturdaten.

Die Innovation besteht in der Nutzung von Wegmarken im Gleis für ein differenzielles GNSS-Verfahren, das sich lokal auf dem Schienenfahrzeug befindet. Als

Anwendungsbeispiel wird die Nutzung der Lokalisierungseinheit als sicherer Odometriesensor für das Zugsicherungssystem ETCS genannt. ETCS-Eurobalisen werden dann als ortsfesten Wegmarken genutzt.

Das Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ wurde für die Aufnahme von Referenzmessdaten und weiteren Versuchsfahrten eingesetzt. Die Wegmarken (Anhang A.7.4) in dem Versuchsaufbau lassen sich von einem RFID-System auslesen sowie von Wirbelstrom- und Lasersensoren vermessen.

Im zweiten Projektteil wurde die in dieser Arbeit beschriebene Simulationsumgebung als Entwicklungs- und Testumgebung für die Lokalisierungseinheit entwickelt.

3.3 Eisenbahntestgebiete

Mit dem Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ werden verschiedene Gleisanlagen und Testgebiete im Aachener Raum genutzt, die im Folgenden vorgestellt werden.

3.3.1 Gleisanlagen des Institutes für Schienenfahrzeuge und Fördertechnik (IFS) der Universität RWTH Aachen

In den 1960er Jahren wurde für das „Institut für Fördertechnik und Schienenfahrzeuge“ (IFS) ein neues Institutsgebäude mit Versuchshalle am Seffenter Weg in Aachen gebaut. Neben dem Institutsgebäude entstand eine Werkhalle (Abb. 18), die über einen eigenen Gleisanschluss zum öffentlichen Eisenbahnnetz und daran angeschlossene Rangieranlagen (Abschnitt 5.14.1) verfügt. In der Versuchshalle mit mechanischer Werkstatt und Krananlage ist ein Rangiergleis mit Grube verlegt. Das Institut betreibt einen eigenen Fuhrpark mit einer Rangierlok Köf 2, einem Zweiwegewagen (Zweiweg ZW MB 3 Mercedes-Benz Typ 308), einer Dampflok D3, einem als Messwagen umgebauten Bahnpostwagens „mrz“ und dem Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“. Die Schienenfahrzeuge werden in der Versuchshalle gewartet und für wissenschaftliche Versuche vorbereitet. Die Rangiergleise des Institutes können für Inbetriebnahme- und Versuchsfahrten genutzt werden.



Abb. 18: IFS-Institutsgebäude (links) und Werkhalle mit Gleisanschluss (rechts)

Weitere Informationen zu den Rangieranlagen sind in der Streckendefinition für die Simulationsumgebung in Abschnitt 5.14.1 dokumentiert. Abb. 116 zeigt den IFS-Erprobungsträger auf dem Hallengleis vor der Versuchshalle.

3.3.2 Siemens Prüf- und Validationcenter Wegberg-Wildenrath (PCW)

Ende der 1990er Jahre entstand auf dem Gelände eines ehemaligen NATO-Flugplatzes (RAF Wildenrath) der Britischen Luftwaffe (Royal Air Force Germany) ein von der Siemens AG gebautes und betriebenes Eisenbahntestzentrum „Siemens Prüf- und Validationcenter Wegberg-Wildenrath“ (PCW). Auf den Gleisanlagen sind Testfahrten unabhängig vom öffentlichen Gleisnetz möglich. In dem Testzentrum werden Erstinbetriebnahmen und Reparaturen für Schienenfahrzeuge durchgeführt. Das PCW bietet als unabhängige Prüfstelle für eisenbahntypische Prüfungen verschiedene Typprüfungen für die Zulassung von neuen Schienenfahrzeugen an [97].

Auf dem Gelände befinden sich umfangreiche Gleisanlagen in Normal- und Meterspur als Test- und Prüfgleise. In den sogenannten Zugbildungshallen mit aufgeständerten Gleisen und auf den Abstellgleisen werden die Züge für Testfahrten vorbereitet. Die meisten Gleise sind mit Oberleitung ausgestattet und können mit den üblichen Spannungen für Bahnstromsysteme versorgt werden. Die Testgleise sind teilweise mit seitlichen Stromschienen englischer Bauart oder berliner Bauart ausgestattet. Es sind verschiedene Zugsicherungssysteme verbaut, die in Testszenarien variabel ein- und umgeschaltet werden.

Testfahrten mit Geschwindigkeiten von 140 *km/h* (max. 160 *km/h*) können auf dem großen Testring T1 (Länge: 6,2 *km*, Bogenradius 700 *m*) durchgeführt werden. Auf dem Testring T2 (Länge: 2,5 *km*, Bogenradius 300 *m*) sind Gleise für Normalspur und Meterspur verlegt. Es sind Geschwindigkeiten bis 100 *km/h* zugelassen. Die Besonderheit der Testringe T1 und T2 besteht in der Möglichkeit auf geschlossenen Ringen Testfahrten ohne Distanzbegrenzung durchzuführen. Auf dem Gelände befinden sich weitere Test- und Prüfgleise.

Die vom Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ befahrenen Gleisanlagen sind als Streckendefinition (Abschnitt 5.14.2) in der Simulationsumgebung implementiert.

3.3.3 Galileo Testzentrum railGATE

Mit der Entwicklung des europäischen Satellitennavigationssystems Galileo sind für alle Verkehrsträger GATE-Testzentren entstanden. Im Rahmen des Projektes Galileo-above ist auf dem Prüf- und Validationcenter Wildenrath das Galileo-Testzentrum railGATE (Abb. 19) für den schienengebundenen Verkehr aufgebaut

worden [98]. Parallel sind das automotiveGATE für Straßenfahrzeuge und das Aldenhoven Testing Center (ATC) entstanden. In den Testzentren sind, unabhängig oder in Kombination mit GNSS-Satelliten, Testszenarien in verschiedenen Frequenzbändern möglich.

An acht bis zu 60 Meter hohen Masten (Abb. 19) sind Pseudosatellitensender angebracht, die ein GNSS-Signal des zukünftigen europäischen Satellitennavigationssystems Galileo aussenden. Spezielle railGATE-Empfänger können sich mit diesen Signalen auf dem Testgelände orten.

Zusätzlich sind Mesh-WLAN-Access-Points an den Masten und an den Gleisanlagen verbaut, um über das gesamte Gelände ein Mesh-WLAN aufzuspannen. Über das Mesh-WLAN werden Steuerungs-, Mess- und Korrekturdaten zwischen den Masten, der Monitorstation, der Referenzstation und den Empfängern übertragen.

Jeder railGATE-Empfänger (Anhang A.8.4) hat neben einer GNSS-Antenne zum Empfang der ausgesendeten Pseudosatellitensignale und GNSS-Satellitensignale zusätzlich zwei unabhängige Mesh-WLAN-Module.

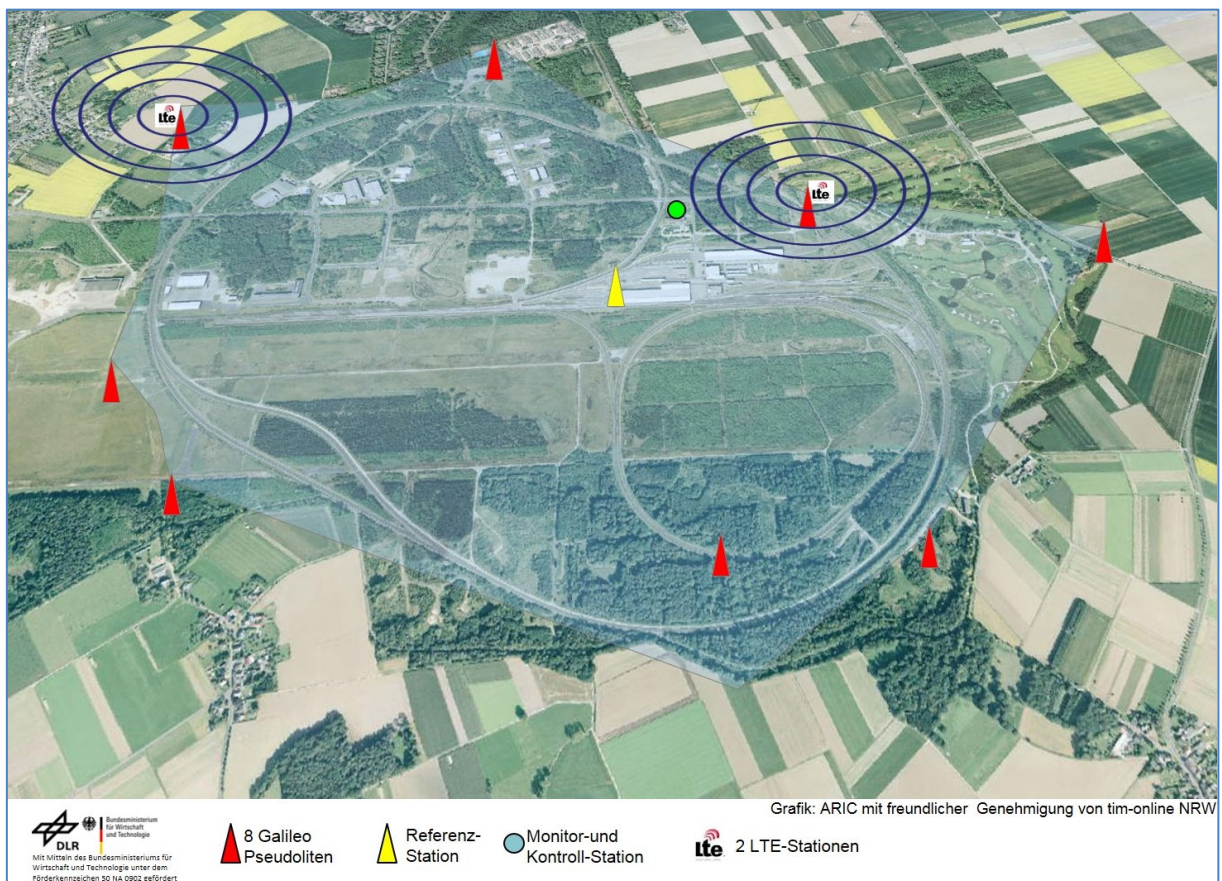


Abb. 19: Luftbild des Prüf- und Validationcenters in Wegberg-Wildenrath. Die roten Dreiecke kennzeichnen symbolisch Standorte der acht Pseudoliten des railGATE. (Quelle: ARIC)

Das funktionale Modell des railGATE-Testzentrums ist in der Simulationsumgebung in Abschnitt 5.13.6 beschrieben. Simulationsergebnisse werden in Abschnitt 7.3.6 dargestellt.

3.3.4 Überführungsfahrten auf dem öffentlichen Gleisnetz

Bei den Fahrten zwischen den Testgebieten in Wildenrath und Aachen muss das Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ als BOA-Fahrzeug wie ein passiver Wagen von einer Güterzuglok über das öffentliche Schienennetz transportiert werden. Während den Überführungsfahrten werden Streckendaten mit der installierten Messtechnik aufgezeichnet. So lassen sich interessante Messdaten von sehr langen Strecken aufnehmen.

3.4 Eisenbahnversuchsfahrzeuge

Neben den für den regulären Personen- oder Güterverkehr genutzten Zügen werden für die Instandhaltung der Gleisanlagen, für die Zulassung von Schienenfahrzeugen und in Forschungsprojekten verschiedene Sonderfahrzeuge eingesetzt.

Bei der Entwicklung neuer Schienenfahrzeuge werden die ersten Prototypen für betriebsinterne Tests und im Rahmen der Zulassung genutzt.

Infrastrukturbetreiber haben die Verpflichtung, die öffentlichen Gleisanlagen in regelmäßigen Abständen und nach Baumaßnahmen zu überprüfen. Der Fokus liegt hier auf der vorgeschriebenen regelmäßigen Vermessung und Bewertung des Verschleißzustandes [99] und der Erkennung von Fehlstellen. Dies wird durch Gleismessfahrzeuge der Infrastrukturbetreiber übernommen, z.B. das RAILab2 [100, 101] oder der ICE-S/ICE-R [102] in Deutschland, der SNCF TGV IRIS 320 in Frankreich oder die ADIF-Baureihe 330 „Seneca“ in Spanien. Weitere Streckeneigenschaften wie das Lichtraumprofil werden mit dem Lichtraummessfahrzeug „LIMEZ III“ [103] oder Multifunktions-Messfahrzeugen [104, 105] vermessen.

Im Rahmen moderner zustandsbasierter Instandhaltung werden im Regelbetrieb fahrende Schienenfahrzeuge mit zusätzlicher Messtechnik ausgestattet, um Eigenschaften des Fahrweges in kurzen Intervallen zu messen [106].

Verschiedene Forschungseinrichtungen betreiben Versuchsfahrzeuge zur Forschung und Technologieentwicklung von Schienenfahrzeug- und Infrastruktursystemen. Eine Auswahl von Versuchsfahrzeugen wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

3.4.1 Messstraßenbahn in Dresden

Seit 2009 verkehrt auf dem Straßenbahnnetz der Stadt Dresden eine mit zusätzlicher Messtechnik ausgestattete Straßenbahn (Abb. 20). In einem Kooperationsprojekt zwischen der TU-Dresden, den Dresdner Verkehrsbetrieben und weiteren Industriepartnern werden Fahrzeug- und Infrastrukturmessdaten während des regulären Linienbetriebes über einen langen Zeitraum (5 Jahre) gesammelt.

Der Schwerpunkt der verbauten Sensorik liegt auf mechanischen Messgrößen. „Aufgezeichnet werden Beschleunigungen und Vibrationen im Fahrwerksbereich und am Wagenkasten, Federwege der Primär- und Sekundärfederung, Ausdehnung zwischen Drehgestell und Wagenkasten, Dehnungen bzw. Strukturspannungen an besonders belasteten Stellen des Wagenkastens sowie Temperaturwerte. Darüber hinaus erfolgt eine Aufzeichnung von 51 Kanälen des Fahrzeugbussystems (MVB). Diese sind besonders für Untersuchungen im Bereich Energieverbrauch und Energieeffizienz von großem Nutzen, da hierdurch kontinuierlich der Energiefluss an den elektrischen Fahrzeugsystemen erfasst werden kann. Außerdem ermöglicht ein systemeigenes GPS-Modul eine zeitsynchrone Ortszuordnung aller Messsignale.“ [78]



Foto: Christian Klotz (TU-Dresden)

Abb. 20: Dresdner Messstraßenbahn [107]

In Auswerteprojekten werden verschiedene Aspekte des Schienenfahrzeuges und der Schieneninfrastruktur untersucht. Die mechanischen Belastungen auf das Fahrzeug bei einem normalen Fahrbetrieb waren am Beginn des Projektes von Interesse. Als neues Untersuchungsgebiet wurde die multisensorielle Fahrzeugortung aufgenommen. Anhand von GNSS-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsdaten werden charakteristische Muster zur Positionsbestimmung genutzt. Mit den verorteten Beschleunigungsdaten wird die Gleisqualität des Streckennetzes analysiert und Abschnitte mit schlechter Gleisqualität und hohem Erneuerungsbedarf ermittelt. Es

wurde ein Fahrerassistenzsystem zum vorausschauenden Fahren entwickelt und getestet. Weiterhin dient die Messstraßenbahn als Referenzfahrzeug für Strukturdynamiksimulationen, Fahrzeugtechniksimulationen mit Versorgungsnetz und Betriebssimulationen.

Eine detaillierte Beschreibung der verbauten Messtechnik geben Striegler et al. [108]. Den Ausbauzustand im Jahr 2014 und die Projektergebnisse fassen Dürschmidt et al. [78] zusammen. Der Betrieb der Messstraßenbahn wurde um weitere 5 Jahre bis 2019 verlängert.

3.4.2 Zweiwegefahrzeug DLR RailDrIVE

Das Zweiwegefahrzeug RailDrIVE des DLR-Instituts für Verkehrssystemtechnik in Braunschweig (Abb. 21) wird als mobile Versuchsplattform für Ortungs- und Navigationsthemen eingesetzt.

Als Positionssensorik ist ein GNSS-Referenzempfänger mit SAPOS-Korrekturdaten installiert. Die Bewegung des Fahrzeuges wird mit Radimpulsgebern an den Schienenrädern gemessen. Die Geschwindigkeit lässt sich über die Radimpulsgeber, mehrere Doppler-Radare und einem optischen Correvit-Sensor messen.



Abb. 21: DLR RailDrIVE [109]

Die Beschleunigung und Winkelgeschwindigkeit in allen Raumachsen werden über Inertialsensorik (IMU) bestimmt. Als Wegmarkensensorik sind ein ETCS-Balisenlesegerät, ein RFID-Empfänger und ein vertikaler Laserabstandssensor verbaut. Zur

Umfeldererkennung und Vermessung befinden sich eine Stereokamera und mehrere Rotationslaser auf dem Fahrzeug.

Ein Forschungsschwerpunkt sind Ortungsplattformen für sicherheitskritische Anwendungen im Eisenbahnbereich, z.B. Zugleit- und Sicherungssysteme (ERTMS). Im Rahmen mehrerer Forschungsprojekte (z.B. DemoORT [82], POSITRON [110], GaLoRoi [89], PiLoNav [90]) und Industrieprojekte wurde umfangreiche Software zur Verarbeitung und Analyse der Messdaten entwickelt.

3.4.3 Vollbahn-Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“

Das Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ der Universität RWTH Aachen wird vom Institut für Schienenfahrzeuge und Fördertechnik (IFS) betrieben.

Das Schienenfahrzeug wurde um die Jahrtausendwende als Windhoff-CargoSprinter-Triebfahrzeug im Projekt CargoMover erworben und mehrfach umgebaut. Als Versuchsfahrzeug „CargoMover“ und später „IFS-Erprobungsträger 1“ wird es seitdem in verschiedenen Forschungs- und Entwicklungsprojekten eingesetzt.

Das Versuchsfahrzeug wird in dieser Arbeit intensiv als Referenzfahrzeug für die Simulationsumgebung verwendet. Eine ausführliche Darstellung des Fahrzeuges befindet sich in Anhang A.

4 Simulationsumgebung Basissoftware

Im Folgenden werden die Eigenschaften und Strukturen einer Simulationsumgebung vorgestellt, in der eine Schienenfahrzeug-, eine Fahrzeugtechnik- und eine Eisenbahninfrastruktursimulation mit einem absoluten Raum- und Zeitbezug umgesetzt sind. Als Entwicklungsumgebung für Schienenfahrzeuganwendungen stellt eine solche Simulationsumgebung ein konsistentes Schienenfahrzeug- und Umgebungsmodell mit einer durchgängigen generischen Struktur bereit. Der absolute Raum- und Zeitbezug bildet die Grundlage für Schnittstellen zu Systemen außerhalb des Bahnumfeldes.

In diesem Kapitel werden die grundlegenden Softwareeigenschaften und Strukturen der Simulationsumgebung eingeführt. Das anschließende Kapitel 5 beschreibt die in der Simulationsumgebung aktiv ausgeführten Simulationsmodelle.

Zur Beschreibung der Software ist in Abschnitt 4.1 eine Präzisierung der Zielstellung und eine darauf aufbauende Anforderungsanalyse vorangestellt.

Die Softwarearchitektur der Simulationsumgebung wird in Abschnitt 4.2 vorgestellt. Darin werden ein Verbund mehrerer Softwaresysteme und deren Informationsfluss beschrieben, mit dem eine Schienenfahrzeug- und Umgebungssimulation erstellt, durchgeführt und analysiert werden kann. Die drei großen Modellteile der Simulationsumgebung – das Simulink-Zentralmodell, das Infrastrukturmodell und die Mehrkörpersimulation – werden mit ihren funktionalen Aufgaben und Schnittstellen in den Informationsfluss eingeordnet.

Zur Konfiguration, Automatisierung und Visualisierung des Simulationsdurchlaufes hat sich eine modellunabhängige Basissoftware herausgebildet. Die Programmteile Szenariosteuerung (Abschnitt 4.3), Gleisatlas-Server (Abschnitt 4.4) und der Szenario-Live-Viewer (Abschnitt 4.5) werden vorgestellt.

Aufbauend auf den in Kapitel 2 eingeführten geodätischen Positions- und Bewegungsbeschreibung werden die in der Simulationsumgebung konkret angewendeten Koordinatensysteme und deren Verwendung in Abschnitt 4.6 definiert.

Der Abschnitt 4.7 enthält abschließend ein separates Programmpaket zur automatisierten Fahrweg- und Fahrplangenerierung.

4.1 Zielsetzung und Anforderungen an die Simulationsumgebung

Abschnitt 1.1 legt die Zielsetzung, den Untersuchungsgegenstand und die angewendete Methode für eine in dieser Arbeit zu erstellende Simulationsumgebung fest. Davon ausgehend werden in diesem Abschnitt konkrete funktionale und technische Anforderungen an die Simulationsumgebung abgeleitet.

Allgemeine funktionale Anforderungen

In der Simulationsumgebung werden folgende Bewegungen gleichzeitig simuliert:

- die Bewegung eines Schienenfahrzeuges in einem geodätischen Koordinatensystem,
- die Bewegung von Fahrzeugkomponenten und
- die Bewegung von Navigationssatelliten.

Das Vollbahn-Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ der Universität RWTH Aachen wird als Referenzfahrzeug in der Simulationsumgebung abgebildet. Zur Vorbereitung und Analyse von Versuchsfahrten für Bewegungssensorik und Steuerungsfunktionen wird eine Entwicklungs- und Simulationsumgebung aufgebaut.

Es werden virtuelle Testfahrten in einer Software-in-the-Loop- (SiL-) Umgebung mit einem simulierten Schienenfahrzeug durchgeführt. Die Versuchsbedingungen der realen und der simulierten Testfahrt sind vergleichbar.

Es werden eine generische Systemstruktur des operativen Eisenbahnsystems angelegt und die für die Durchführung der virtuellen Testfahrten notwendigen Komponenten und Schnittstellen in einer geeigneten Detailtiefe modelliert.

- Dies sind für den Bereich Eisenbahninfrastruktur: Leitstelle, Stellwerk und das Zugleit- und Zugsicherungssystem ERTMS/ETCS.
- Das Schienenfahrzeug wird mit den Bereichen: Fahrzeugtechnik, Bewegungsmodell und Sensorik modelliert.
- Das Umgebungsmodell berechnet für alle Objekte eine absolute, dreidimensionale Position und Bewegung.

Offenheit/Wartbarkeit/Schnittstellen: Zur Integration der verschiedenen Simulationsmodule werden offene und bevorzugt standardisierte Schnittstellen verwendet, um die Wartung und spätere Weiterentwicklung zu fördern.

Erweiterbarkeit: Die Simulationsumgebung unterstützt die Weiterverwendung, Erweiterung und Detaillierung in neuen Projekten durch ihre Struktur, Implementierung und Dokumentation.

Funktionale Modellierung: Soweit möglich und sinnvoll, werden Originalkomponenten – insbesondere Software – in die Simulationsumgebung eingebunden. Andernfalls wird die benötigte Funktionalität der Komponente durch eine funktionale Modellierung nachgebildet. Dies bedeutet, dass z.B. nicht der Original-Quellcode verwendet wird, sondern ein System mit gleichem Funktionsumfang oder ähnlichem Verhalten. Auf diese Weise ist die Modellierung unabhängig von Herstellern und Randbedingungen wie Konformität, Vollständigkeit, Fehlerbehandlung, Hardwareplattform oder einem zertifizierten Entwicklungsprozess.

Rahmenbedingungen der Implementierung

Die Simulationsumgebung wird aus einer Kopplung von spezialisierten Simulationsprogrammen der beteiligten Fachdisziplinen aufgebaut. So werden die Vorteile der Simulationsprogramme und das vorhandene Know-how miteinander verbunden. Die vorhandenen Modelle können wiederverwendet werden.

Die Szenariosteuerung der Simulationsumgebung wird in MATLAB, eine der am weitesten verbreiteten Entwicklungsumgebungen, programmiert.

Für die signalbasierte Modellierung wird die Software MATLAB/Simulink verwendet. Eine durchgängig grafische Modellierung in Simulink verbessert die Lesbarkeit des Signalflusses und das Verständnis der Abfolge und Zusammenhänge von Funktionen. In signalbasierten Teilmodellen werden die Fahrzeugtechnik, die eindimensionale Bewegung und die Sensorik des Schienenfahrzeuges simuliert. Alle weiteren Simulationsprogramme werden zentral an das Simulink-Modell gekoppelt. Es wird im Folgenden als Simulink-Zentralmodell bezeichnet.

Das zentrale Rapid-Control-Prototyping-Steuergerät (RCP, dSPACE) des Versuchsfahrzeuges „IFS-Erprobungsträger 1“ wird ebenfalls über Simulink programmiert, sodass die in der Simulationsumgebung mit Simulink modellierten Algorithmen sich mit geringen Änderungen auf dem RCP-System ausführen lassen.

Die eindimensionale Bewegung des Schienenfahrzeuges wird in einer an das Simulink-Zentralmodell gekoppelten Mehrkörpersimulation (MKS, SIMPACK) in eine dreidimensionale Bewegung umgewandelt. Die Benutzerschnittstelle zur Modellierung von dreidimensionalen Fahrzeugstrukturen ist bei MKS-Programmen deutlich komfortabler als die rein signalbasierte mathematische Beschreibungsweise. Die vorhandenen MKS-Modelle von Schienenfahrzeugen lassen sich mit geringem Aufwand in die Simulationsumgebung integrieren.

Die ereignisbasierten Modelle der Eisenbahninfrastruktur werden in der Programmiersprache Python modelliert. Zur Kommunikation zwischen dem Python-Server und der Schienenfahrzeugsimulation im Simulink-Zentralmodell dient eine Ethernet-Verbindung mit dem standardisierten ETCS-Protokoll.

Konkrete Anforderungen an die Implementierung der Koordinatensysteme

Für alle sich bewegenden Bauteilen des Schienenfahrzeuges wird ein lokales, körperfestes Koordinatensystem definiert.

Alle Positionen in lokalen Koordinatensystemen werden durch Koordinatentransformation in ein geozentrisches Koordinatensystem ECEF des WGS84-Datums konvertiert. Das ECEF-Koordinatensystem ist das Basiskoordinatensystem für die Beschreibung aller dreidimensionalen Positionen und Bewegungen.

Die mit einem kontinuierlichen oder diskreten Solver ausgeführten Modelle der Simulationsumgebung werden auf die koordinierte Weltzeit UTC bezogen.

Aus der Kombination von absoluter Positionsbeschreibung und absoluter Zeitbeschreibung ergibt sich eine allgemeine und eindeutige Bewegungsbeschreibung.

Funktionale Anforderung an die Infrastruktur und Bewegungsvorgabe

Um eine realitätsnahe Bewegung des simulierten Schienenfahrzeuges vorzugeben, wird eine funktionale Implementierung des Zugleit- und Zugsicherungssystems ERTMS/ETCS genutzt. Insbesondere sind die verwendeten ETCS-Komponenten und Schnittstellen mit dem in der Simulationsumgebung notwendigen Funktionsumfang nach deren Spezifikation implementiert.

Die Eisenbahninfrastruktursimulation und die ETCS-Schnittstelle zum Schienenfahrzeug sind auf dem Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ in einer Hardware-in-the-Loop-Architektur nutzbar.

Funktionale Anforderungen an die Sensoren sowie Stör- und Fehlersignale

Aus der ein- und dreidimensionalen Bewegung des simulierten Schienenfahrzeuges werden die physikalischen Zustände des Schienenfahrzeugmodells sowie die physikalischen und technischen Rohsignale aller Bewegungssensoren erzeugt.

In der Simulation werden alle physikalischen und technischen Rohsignale der Bewegungssensoren am Referenzfahrzeug durch Sensormodelle erzeugt.

Die erzeugten Sensorsignale sind durch ein Sensor-Störungsmodell mit bekannten Störungen und mit einem Sensor-Fehlermodell mit bekannten Fehlereigenschaften veränderbar, um realistische Sensorsignale zu erzeugen.

Besondere Anforderungen an das Satellitennavigationsmodell

Aus den Satellitenbahndaten (Ephemeriden) kann man die Position der Navigationssatelliten zu absoluten Zeitpunkten berechnen.

Aus der absoluten Position der Navigationssatelliten und der absoluten Position der GNSS-Antenne (auf dem Schienenfahrzeug) lässt sich der wahre Abstand zwischen Satellit und Antenne (Truerange) als ein ideales GNSS-Rohsignal bestimmen.

Durch Aufprägung von systematischen und zufälligen Störungen auf ideale Satellitenabstände in einem GNSS-Störungsmodell werden Satellitensignale erzeugt, wie sie in einem realen GNSS-Empfänger empfangbar wären (Pseudorange). Diese gestörten GNSS-Signale werden durch ein Fehlermodell bewusst verfälscht, um die Robustheit der Auswertelgorithmen zu testen.

4.2 Softwarearchitektur

Die grundlegende Struktur der Simulationsumgebung (Abb. 22) als eine Simulationssoftware ist, wie im Folgenden beschrieben, generisch aufgebaut. Der Simulationsablauf der Simulationsumgebung wird in einem zentralen Ablaufskript als Szenariosteuerung in MATLAB realisiert.

Die Bewegungssteuerung des simulierten Schienenfahrzeuges wird durch eine Eisenbahninfrastruktursimulation vorgegeben. Die Implementierung erfolgt durch den ereignis- und objektbasierten Softwareanteil in der Programmiersprache Python. Ein Fahrplan konfiguriert den Fahrweg und die Fahrzeiten. Eine Leitstelle gibt die Fahrbewegung vor. Das Stellwerk legt und sichert den Fahrweg. Als Zugleit- und Zugsicherungssystem wird ETCS (Abschnitt 2.2) genutzt. Die ETCS-Streckenzentrale sendet die Fahrbefehle an die ETCS-Fahrzeugausrüstung und erhält Positions- und Statusinformationen zurück.

Die Schienenfahrzeugsimulation ist in einen signalbasierten Teil in MATLAB/Simulink und einen Mehrkörpersimulationsteil in SIMPACK getrennt. Das Simulink-Schienenfahrzeugmodell soll aus allen wichtigen Strukturelementen eines Schienenfahrzeuges bestehen. Somit wird die ETCS-Fahrzeugausrüstung in das ETCS-Steuergerät (ETCS Onboard Unit, ETCS-OBU) und das ETCS-Anzeigegerät (ETCS Driver Machine Interface, ETCS-DMI) aufgeteilt. Ein Fahrermodell nimmt die Informationen des ETCS-Anzeigegerätes auf und gibt einen Beschleunigungswunsch an das Zentralsteuergerät weiter. In einem Fahrzeugtechnikmodell erzeugt das Antriebs- und Bremssystem im eindimensionalen Fahrzeugmodell eine Bewegung des Schienenfahrzeuges auf dem 1D-Fahrweg. Über eine Co-Simulationsschnittstelle ist an das Simulink-Zentralmodell eine Mehrkörpersimulation in SIMPACK angeschlossen. Darin wird die eindimensionale Bewegung des Schienenfahrzeuges in eine dreidimensionale Bewegung eines Starrkörpermodells in einem erdfesten Umgebungskoordinatensystem umgewandelt. Die simulierten physikalischen Zustände der Körper und Elemente in der Mehrkörpersimulation (Positionen, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, Distanzen, Winkel, Kräfte, Momente, ...) werden an das Simulink-Zentralmodell zurückgegeben. In Sensormodellen werden aus den physikalischen Zuständen aller Modelle realitätsnahe Sensorsignale erzeugt.

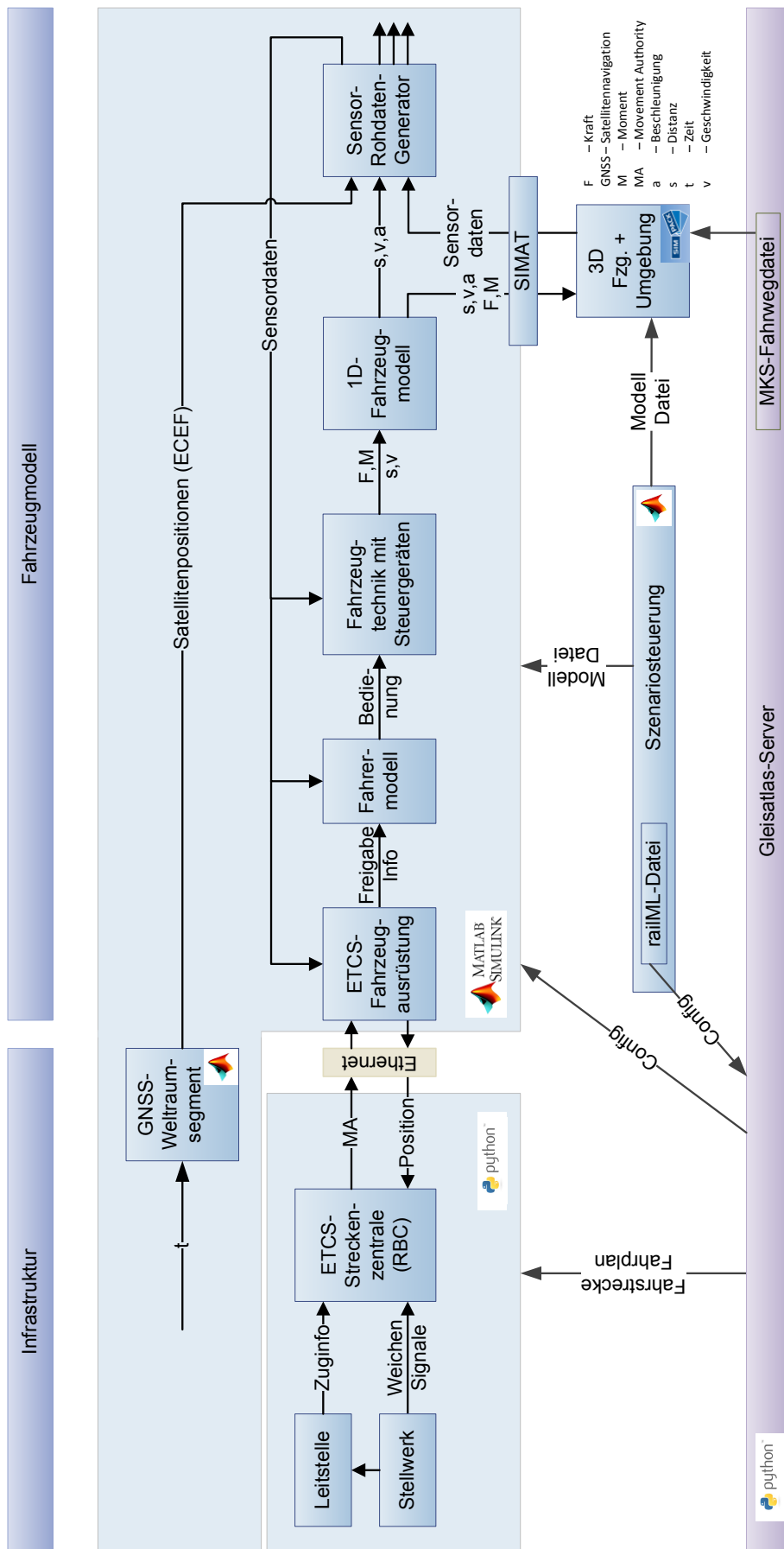


Abb. 22: Simulations- und Systemstruktur der Simulationsumgebung

Die Besonderheit dieser Simulationsumgebung ist die Umgebungssimulation für die Satellitennavigation. Zur Generierung von GNSS-Rohdaten wird eine Simulation des Weltraumsegmentes (d.h. der sich auf Bahnen bewegenden Satelliten) und des Benutzersegmentes (Empfänger) erstellt.

Aus der Nutzung von Satellitennavigation ergeben sich für die gesamte Simulationsumgebung weitere Randbedingungen. Alle dreidimensionalen Positionen eines Satelliten oder eines Schienenfahrzeuges müssen in ein erdfestes kartesisches Referenzkoordinatensystem (ECEF) transformiert werden, um Abstände und Richtungen zu bestimmen. Die Simulationszeit muss mit einer globalen Zeitbasis synchronisiert sein, da sich die Satellitenkonstellation auf eine absolute Zeitreferenz bezieht.

In der Simulationsumgebung wird zwischen Funktionalität und Konfiguration getrennt. Konfigurationsskripte in MATLAB konfigurieren die aktive Simulation und beschreiben zentral die Eigenschaften eines Szenarios.

Durch eine weitere Software „Strecken-Generator“ werden in einem MATLAB-Skript die Streckendefinition und der Fahrplan erstellt (Abschnitt 4.7) und automatisiert als railML-Datei [33] abgespeichert. Der Gleisatlas-Server ist ein in der Programmiersprache Python geschriebene Serveranwendung, die den Streckenplan für verschiedene Schnittstellen und Programme zur Verfügung stellt.

4.3 Szenariosteuerung und Simulationsablauf

Ein Simulationsdurchlauf wird durch eine zentrale Ablaufsteuerung (Szenariosteuerung) organisiert. Die in MATLAB geschriebenen Skriptdateien starten alle Simulationsprogramme und Server, initialisieren die Simulationsdurchläufe und speichern die Simulationsergebnisse ab.

In der Simulationsumgebung sollen auch Szenarien mit wechselnden Fahrtrichtungen und Fahrwegen, z.B. Rangierungen, dargestellt werden. Dabei weist das verwendete Mehrkörpersimulationsprogramm SIMPACK die technische Restriktion auf, dass sich der Streckenverlauf nur bei einem Neustart der Simulation ändern lässt. Daher wird der Simulationsablauf in Teilsimulationen mit jeweils konstantem Fahrweg unterteilt.


Ein Simulationsdurchlauf wird vollständig durch die Konfigurationsdaten und die konfigurierten Modelldateien bestimmt. Folgende Aktionen werden während eines Simulationsdurchlaufes abgearbeitet:

Der Benutzer hat jederzeit die Möglichkeit, die Zustände der aktiven Simulation zu kontrollieren. Hierfür wird das Simulink-Zentralmodell von der Szenariosteuerung für den Benutzer sichtbar geöffnet und mit dem Beenden der Teilsimulation automatisch geschlossen. Über Statusmeldungen in einem Eingabeaufforderungsfenster oder über

einen Python-Debugger in der Eclipse-Entwicklungsumgebung werden die Arbeitsschritte des Streckenatlas-Servers und des ETCS-Streckenzentrale-Servers angezeigt.

Start der Simulationsumgebung

- Laden der Konfigurationsdaten
- Start: Streckenatlas-Server, ETCS-Streckenzentrale-Server und SIMAT-Co-Simulationsserver (MATLAB ↔ SIMPACK)

- 
- Start einer Teilsimulation
 - Initialisierung der Simulationsumgebung
 - Teilsimulation der Simulationsumgebung
 - Speicherung der Teilsimulationsergebnisse
 - Vorbereitung des nächsten Teilsimulation
 - Start der nächsten Teilsimulation, bis die Zielsituation erreicht ist
 - Zusammenfassung und Verarbeitung der Simulationsergebnisse
 - Beenden der Simulationsumgebung

Ende der Gesamtsimulation

Die Position des Schienenfahrzeuges und die Streckeneigenschaften werden im Szenario-Live-Viewer angezeigt. Die Simulation lässt sich durch den Benutzer im Simulink-Zentralmodell oder in der MATLAB-Eingabeaufforderung jederzeit anhalten oder abbrechen.

4.4 Streckenatlas-Server

Der Streckenatlas-Server ist eine in Python geschriebene Serveranwendung ohne grafische Oberfläche. Er stellt die Strecken- und Fahrplandaten für die einzelnen Anwendungen der Simulationsumgebung zur Verfügung. Über lokale Netzwerkadressen (URLs) kann die MATLAB-Szenariosteuerung vom Streckenatlas-Server Daten und Dateien herunterladen. Die Datengrundlage bildet eine im railML-Format vorliegende Strecken- und Fahrplanbeschreibung (siehe Abschnitt 4.7). In der railML-Datei wird ein vollständiges Gleisnetz mit allen Eigenschaften beschrieben. Aus dem ebenfalls in der railML-Datei abgelegten Fahrplan ergibt sich, welche Strecken ein Zug in welcher Reihenfolge und in welchem Fahrprofil abfahren soll. Mit diesen Daten wird eine Objektstruktur angelegt und eine relationale Datenbank (SQLite) gefüllt, auf die zur Laufzeit zugegriffen wird.

Der Streckenatlas-Server erkennt aus dem Fahrplan, welche Route das Schienenfahrzeug auf dem Streckennetz abfahren soll. Daraus lässt sich für jede Teilsimulation

die passende Strecke im benötigten Datenformat erzeugen. Beim Wechsel der Teilsimulationen kann der Streckenatlas-Server aus der letzten gemeldeten Position des Schienenfahrzeuges, bestehend aus dem letzten überfahrenen Meilenstein und der anschließend gefahrenen Distanz, nachvollziehen, wo sich das Schienenfahrzeug am Ende der abgeschlossenen Teilsimulation befunden hat. Der aktuell befahrene Streckenabschnitt und die nach Fahrplan weiter zu befahrende Streckenabschnitte werden als neue Strecke bestimmt.

Zur Konfiguration der Mehrkörpersimulation wird eine Streckendatei im SIMPACK-Format „measured track“ (*.trm) erstellt und als Datei „track.trm“ (Anhang B.4) abgelegt. Auf die Datei wird bei jedem Start einer Teilsimulation neu zugegriffen.

4.5 Szenario-Live-Viewer

Über die Weboberfläche des Szenario-Live-Viewers werden die gerade verwendeten Streckendaten und die Position des Schienenfahrzeuges auf einer generalisierten Karte oder auf einem Luftbild während der Simulation angezeigt. Hierbei wird die aktuelle Teilstrecke mit den Balisen und Meilensteinen sowie die letzte an die ETCS-Streckenzentrale gemeldete Position des Schienenfahrzeuges angezeigt.



Abb. 23: Browseransicht des Szenario-Live-Viewers mit einer OpenStreetMap-Karte auf der inneren Abstellgruppe des Prüf- und Validationcenters in Wildenrath

Abb. 23 zeigt die Ansicht des Szenario-Live-Viewers während eines Simulationsdurchlaufes. Die blaue Linie beschreibt die aktuell befahrene Trasse. Die blauen Pfeile auf der Trasse beschreiben die Definitionsrichtung der Primitiven (siehe Abschnitt 4.7.1), aus denen sich die Trasse zusammensetzt. Ein Pfeil ist in der Mitte jeder Primitive angeordnet. Die gelben Fahnen zeigen die Position von ETCS-Eurobalisen. In diesem Szenario werden die ETCS-Eurobalisen automatisiert in Balisengruppen von je zwei Balisen zu Beginn jeder Streckenprimitive angeordnet. Die Nummer der ETCS-Eurobalisengruppe wird durch den Marker mit einem vorangestellten „B“ angezeigt. Die erste gelbe Fahne ist von einer roten Fahne an gleicher Position überdeckt. Rote Fahnen sind vom ETCS-System unabhängige Meilensteine

der Simulationsumgebung. Die Nummer des Meilensteins wird durch den Marker mit einem vorangestellten „M“ dargestellt. Der blaue Marker mit der Bezeichnung „Train Position“ beschreibt die aktuelle Position der Spitze des Schienenfahrzeuges.

4.6 Systematik der Koordinatensysteme

In der Simulationsumgebung werden alle Positionen und Bewegungen auf ein absolutes, erdfestes Bezugssystem bezogen, um eine einheitliche Beschreibungsbasis für stationäre, fahrende und fliegende Objekte herzustellen. Hierfür wurde eine durchgängige Systematik für Umgebungs- und Fahrzeugkoordinatensysteme entwickelt und auf die Umgebungssimulation, die Mehrkörpersimulation und das Referenzfahrzeug (Anhang A.10) angewendet.

Das Basiskoordinatensystem für dreidimensionale Positions- und Bewegungsangaben ist das ECEF-Koordinatensystem des WGS84-Datums. Von diesem Koordinatensystem ausgehend werden alle in der Simulationsumgebung verwendeten Koordinatensysteme durch standardisierte Koordinatentransformationen (Anhang D.2) erreicht. Die Entwicklung der geodätischen Koordinatensysteme wurde in Abschnitt 2.5 vorgestellt.

Das ECEF-Koordinatensystem ist ein kartesisches erdfestes Koordinatensystem mit dem Ursprung am Erdmittelpunkt. Auf Basis des WGS84-Referenzellipsoiden lässt sich aus den kartesischen Koordinaten die Beschreibung in Breitengrad, Längengrad und Höhe (über dem Referenzellipsoiden) ableiten, die in der Koordinatensystemdarstellung „LLA“ oder „BLH“ verwendet wird.

Der Ursprung des Basiskoordinatensystem der Mehrkörpersimulation „KS-MKS“ ist am Startpunkt der zu simulierenden Strecke definiert, sodass der Fußpunkt des Koordinatensystems im ECEF ebenfalls mit dem Start der Fahrstrecke zusammenfällt. Die horizontale XY-Ebene ist an der Position des Fußpunktes tangential zum WGS84-Referenzellipsoid. Die X-Achse sollte in die Richtung der Trasse am Startpunkt zeigen. Jedoch hat sich gezeigt, dass dies bei der verwendeten Mehrkörpersimulation SIMPACK nicht zwingend notwendig ist.

Das Mehrkörpersimulationsprogramm SIMPACK legt für jeden Körper und Marker ein eigenes kartesisches Koordinatensystem an. Deren Position, Bewegung und Ausrichtung werden in der Mehrkörpersimulation „gemessen“, über die SIMAT-Co-Simulationsschnittstelle in das Simulink-Zentralmodell übertragen und in das ECEF-Koordinatensystem transformiert.

In der Navigation geht man häufig von einem nach Norden (X), Osten (Y) und Unten (Z) ausgerichteten kartesischen Koordinatensystem aus, dem sogenannten Navigati-

onskoordinatensystem (NED). Davon lässt sich weiter die sphärische Darstellung des künstlichen Horizontes (kH) mit Azimut- und Elevationswinkel ableiten. Die Lage des Navigationskoordinatensystems wird auf den WGS84-Referenzellisoiden bezogen, sodass die XY-Ebene am Fußpunkt tangential zum WGS84-Referenzellisoiden liegt.

Das lokale Navigationskoordinatensystem NED und das Koordinatensystem des künstlichen Horizontes kH können, anstatt auf den Referenzellisoiden, auch auf eine Kugel als Erdfigur bezogen werden. So entsteht das NED-Koordinatensystem (NED-Kugel) und das davon abgeleitete Koordinatensystem des künstlichen Horizontes (kH-Kugel). Hierbei entspricht der Radius der Erdkugel der Länge des Fußpunkt-Ortsvektors.

Die Lichtgeschwindigkeit ist in einem feststehenden Koordinatensystem definiert. Als Näherung dafür wird ein an Fixsternen ausgerichtetes Inertialkoordinatensystem (IKS) definiert, das sich auf der Erdumlaufbahn um die Sonne mitbewegt. Im Gegensatz zum Inertialkoordinatensystem ist das ECEF-Koordinatensystem erdfest und dreht sich mit der Erde mit. Der Koordinatenursprung und die Z-Achse des Inertialkoordinatensystems fallen mit dem ECEF-Koordinatensystem zusammen. Es wird eine ideale Drehung des ECEF-Koordinatensystems um die Z-Achse des Inertialkoordinatensystems mit der im WGS84-Datum definierten Erddrehrate angenommen. Abweichungen durch eine Pendelbewegung der Erde, Gezeiten und weiteren Einflussfaktoren werden hier nicht betrachtet.

Zur Erstellung von Streckendefinitionen wurden lokale kartesische Koordinatensysteme mit einem beliebig definierten Fußpunkt und einer beliebigen Ausrichtung definiert. Die Streckendefinition des Prüf- und Validationcenters Wildenrath (PCW) ist im Koordinatensystem KS-PCW definiert (Anhang D.2.7). Die Streckendefinition der IFS-Gleisanlagen ist im KS-IFS Koordinatensystem definiert (Anhang D.2.8).

Auf die Nutzung von geodätischen Abbildungen (Gauß-Krüger, UTM, ...) wird in dieser Arbeit zur Vermeidung von Abbildungsfehlern vollständig verzichtet. Eine Umwandlung der Koordinaten aus externen Quellen, z.B. Karten oder CAD, in das ECEF ist jedoch möglich.

4.7 Erzeugung von Szenariodaten, Strecken- und Fahrplandefinition

In der Simulationsumgebung wird konsequent zwischen Funktionalität und Modellen einerseits und Konfiguration andererseits getrennt. Dies soll die Modellierung und Programmstruktur vereinfachen und die Wiederverwendbarkeit und Allgemeingültigkeit der Modelle erhöhen. Mit den gleichen Modellen sollen möglichst einfach unter-

schiedliche Szenarien mit der Simulationsumgebung betrachtet werden können. Die Eigenschaften der Simulationsumgebung werden an einer zentralen Stelle konfiguriert. Dieser Abschnitt beschreibt die Methode und die technische Umsetzung der Strecken- und Fahrplandefinition. Mit der Software wird die Szenariodefinition automatisiert erstellt und als railML-Datei abgespeichert. In der Simulationsumgebung wird die Szenariodefinition dem Streckenatlas-Server als Konfiguration eines Streckennetzes und Fahrplanes mit einer railML-Datei vorgegeben.

4.7.1 Streckenmodellierung

Der Verlauf von Eisenbahnstrecken wird allgemein durch die Trassierung festgelegt. Darin wird der Fahrweg als eine Abfolge von geometrischen Grundformen (Primitive) wie Gerade, Bogen, Übergangsbogen und weiteren geometrischen Formen beschrieben. Weichen werden als eine Verzweigung modelliert, an dem von einem Punkt aus zwei unterschiedliche Primitive ansetzen.

Als Eisenbahnstrecke wird hier die von einem Schienenfahrzeug befahrbare Schiene angesehen. Die Gleismittellinie beschreibt den Verlauf des Gleises als eine Trasse. Um ein Gleisnetz zu modellieren, müssen der Trassenverlauf der Gleise beschrieben werden. Zusätzlich werden weitere Eigenschaften des Gleises einer Position zugeordnet.

Um eine Streckendefinition (Abb. 24) zu erzeugen, wird die zu erstellende Trasse in einzelne Trassierungselemente zerlegt. Die Trassierungselemente sind die kleinsten Elemente, in die eine Strecke zerlegt wird. Jedes Trassierungselement kann nur eine geometrische Form enthalten. Dies können in der aktuellen Implementierung Gerade, Bogen und Klothoide als Übergangsbogen sein. Ein Trassierungselement wird als eine Primitive bezeichnet. Aus organisatorischen Gründen werden noch Anfangs- und Endelemente, wie offenes Gleisende oder Prellbock, eingefügt.

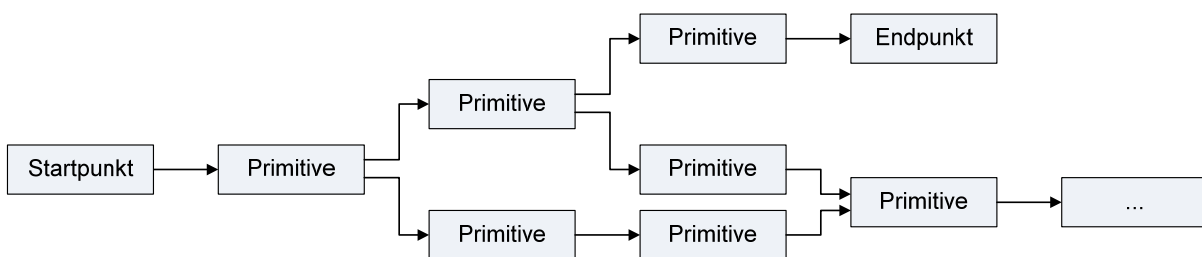


Abb. 24: Streckendefinition durch Aneinanderreihung von geometrischen Grundformen (Primitive) als verkettete Objekte

Jede Primitive ist einer Streckennummer zugeordnet. Die Distanz seit dem Startpunkt einer Strecke mit gleicher Streckennummer wird als Kilometrierung angegeben. Objekte, z.B. Signalanlagen, Wegpunkte, Balisen oder Bahnhöfe, die sich entlang einer Strecke befinden, können durch Streckennummer und Kilometrierung verortet werden.

Über dem Erdboden des Testgebietes, auf dem die Streckendefinition erstellt werden soll, wird ein lokales Koordinatensystem definiert, vorteilhafterweise ein NED-Koordinatensystem. Für sehr lange Trassen kann man die Erdkrümmung nicht vernachlässigen, sodass eine geodätische Abbildung gewählt wird. Ein NED-Koordinatensystem ist mit einem Höhenabstand (quasi horizontal zur Erdoberfläche) tangential zum Referenzellipsoiden ausgerichtet. Die X-Achse zeigt in Nord- und dessen Y-Achse zeigt in Ost-Richtung (Anhang D.2.4). Der Richtungswinkel ist, von der geografischen Nordrichtung ausgehend, als horizontaler Winkel im Uhrzeigersinn definiert.

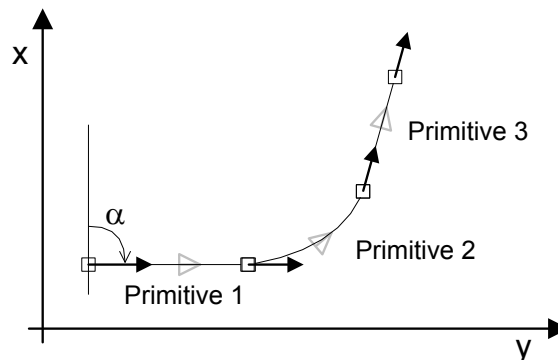


Abb. 25: Primitiven mit Richtungswinkel im lokalen Koordinatensystem

Jeder Punkt in einem lokalen Koordinatensystem lässt sich durch Koordinatentransformation in das ECEF-Koordinatensystem umrechnen. Die Koordinaten des ECEF-Koordinatensystems lassen sich in alle weiteren geodätischen Koordinatensysteme umwandeln.

Nur in dem Startelement wird durch die Konfiguration von Position und Richtung ein Bezug zum lokalen Koordinatensystem hergestellt (Abb. 25). Alle weiteren angehängten Primitiven richten sich relativ zu ihrer Vorgängerprimitive aus.

Die erste Primitive in einer neu zu erstellenden Strecke ist das Startelement. An dieses Startelement kann man die erste Primitive anhängen. An jede Primitive kann eine weitere Primitive angehängt werden, bis die Strecke durch ein Endelement abgeschlossen wird. An einem Startpunkt oder einem Endpunkt einer Primitive kann ein zusätzliches Verzweigungselement eingefügt werden, an das man eine weitere Primitive anhängt. So lassen sich Streckenverzweigungen oder Streckeneinmündungen für Weichen und Kreuzungen erzeugen.

Der Anfangspunkt einer angehängten Primitive und der Endpunkt der vorangegangenen Primitive sind identisch und die sich daraus ergebende Trasse ist kontinuierlich. Demnach müssen folgende Eigenschaften der beiden Punkte identisch sein: XY-Koordinate, Höhe über WGS84-Ellipsoid, Richtungswinkel, Überhöhung und

Kilometrierung. Die Krümmung sollte identisch sein, kann aber auf Rangiergleisen durch die Kombination eines Bogens mit einer Gerade auch sprunghaft wechseln.

In der Simulationsumgebung werden zwei Arten von Wegmarken (ETCS-Eurobalisen und Meilensteine) verwendet. Wegmarken sind als Eigenschaft einer Primitive implementiert und werden als Elemente innerhalb einer Primitive durch die Distanz entlang der Trasse definiert.

ETCS-Eurobalisen, die elektronischen Wegmarken des ETCS-Systems, haben eine eindeutige Balisengruppennummer und weitere Streckeninformationen. ETCS-Eurobalisen werden als Gruppen mehrerer Balisen ausgelegt, um die Richtung der Überfahrt zu bestimmen. In der Simulationsumgebung wurde zusätzlich das Konzept der Meilensteine verwendet. Hierbei werden Wegmarken am Anfang jeder Primitive eingefügt. Anhand des letzten überfahrenen Meilensteins und der seitdem gefahrenen Wegstrecke ist dem Streckenatlas bekannt, an welcher Stelle sich das Schienenfahrzeug befindet. Meilensteine sind eine interne Funktionalität der Simulationsumgebung. ETCS-Eurobalisen und Meilensteine können unabhängig voneinander verlegt werden.

4.7.2 Allgemeiner Aufbau einer Primitive

Jede Primitive enthält Informationen zu ihrem Start- und Endpunkt, Parameter zu ihrer geometrischen Form und zu möglichen Verzweigungen sowie weitere informelle Parameter.

Als geometrische Eigenschaften des Startpunktes werden die XY-Koordinaten im lokalen Koordinatensystem sowie die Richtung und Krümmung des Gleises definiert. Als eisenbahnbetriebliche Größen werden die Gleislänge als Kilometrierung, die Überhöhung des Gleises und die Höchstgeschwindigkeit definiert. Alle weiteren Parameter der Primitive sind abhängig von der geometrischen Form. Als Softwareeigenschaft enthält der Startpunkt einen Bezeichner (ID) und benötigt den Bezeichner des Endpunktes der Primitive, mit der die Primitive verknüpft ist. Innerhalb der Primitive wird eine lokale Länge der Trasse definiert, die am Startpunkt mit null beginnt.

Der Endpunkt der Primitive hat den gleichen Parametersatz wie der Startpunkt.

4.7.3 Implementierung von Primitiven

Die Primitive beschreibt einen Anfangs- und Endpunkt und eine geometrische Eigenschaft zwischen den Punkten. Die Berechnung ist in Software auf verschiedene Weise möglich. Je nachdem, an welchem Ende man die Primitive an ein Streckennetz anschließt, kann man den Startpunkt, Endpunkt oder beide Punkte mit einem Streckennetz verbinden. Zur Kennzeichnung, in welcher Weise die Primitive an das Streckennetz angehängt wurde, ist in Abb. 26 der Richtungswinkel des Anschluss-

punktes als Pfeil markiert. Die Berechnungsrichtung der Primitive wird durch einen Pfeil in der Mitte der Primitive angezeigt.

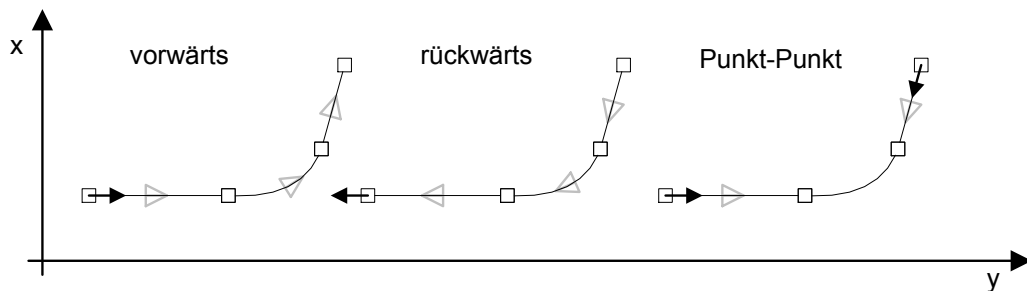


Abb. 26: Streckendefinition in Vorwärtsdefinition, Rückwärtsdefinition und als Punkt-Punkt-Definition; Anfangspunkte mit Richtungspfeil; Primitive-Definitionsrichtung durch Pfeil in der Mitte der Primitive

Der häufigste Fall ist die Vorwärtsdefinition. Dabei wird von einem Startpunkt aus mit den geometrischen Eigenschaften der Primitive ein neuer Endpunkt der Primitive berechnet. In der Rückwärtsdefinition wird aus einem Endpunkt mit den geometrischen Eigenschaften der Primitive ein neuer Anfangspunkt berechnet. Wenn der Anfangspunkt und der Endpunkt bekannt sind (Variante Punkt-Punkt), dann kann auch die geometrischen Eigenschaften der Primitive bestimmt werden.

4.7.4 Integration von Streckenstücken

Freie Streckenstücke bestehen aus zusammenhängenden Primitiven, die im Gegensatz zu Streckendefinitionen kein Startelement enthalten. Sie können an eine Streckendefinition angehängt werden. Streckenstücke können ein oder mehrere Anfangs- oder Endpunkte von Primitiven aufweisen, die nicht mit einer anderen Primitive verbunden (also offen) sind. Wird nun ein Start- oder Endpunkt einer Primitive eines freien Streckenstückes mit einem Start- oder Endpunkt einer Streckendefinition verbunden, haben nun alle Primitiven des Streckenstückes einen eindeutigen Bezug zu einem lokalen Koordinatensystem.

4.7.5 Integration von konfigurierbaren Weichen

Weichen sind standardisierte Elemente des Oberbaus und können als freie Streckenstücke interpretiert werden. In der aktuellen Implementierung der Simulationsumgebung werden Einfachweichen und Bogenweichen unterstützt. Da zu einer Weichenbauart mehrere Ausführungen gehören, bietet es sich an, die Grundstruktur einer Weiche in einem Element zu kapseln und das Element mit den charakteristischen Eigenschaften zu parametrieren. Weichen weisen im Gegensatz zu Primitiven drei Koppelpunkte zu einem Streckennetz auf.

4.7.6 Streckendefinition mit mehreren Startelementen

Die geometrischen Eigenschaften Position und Richtung des Startpunktes einer Primitive ergeben sich aus dem Endpunkt der vorangegangenen Primitive. Verändert man nun die Eigenschaften einer der vorherigen Primitiven, dann verändert sich auch die Lage aller nachfolgenden Primitiven. Dies führt bei großen Streckendefinitionen zu ungewollten Lageverschiebungen von großen Streckenteilen. Um den weiteren Änderungsaufwand zu begrenzen, ist es vorteilhaft, das Streckennetz in Teilstreckennetze mit eigenen Startelementen zu teilen und in einem separaten Schritt die Teilstreckennetze zu einem Gesamtnetz zu verbinden.

Nutzt man mehrere Teilstreckennetze mit je einem Startelement ergibt sich eine Mehrdeutigkeit, wenn man ein Teilstreckennetz mit dem Startpunkt (oder einem offenen Gleisende) eines anderen Teilstreckennetzes koppelt. Die Mehrdeutigkeit kann durch die Definition einer Punkt-Punkt-Primitive vermieden werden. Der Startpunkt entspricht dem Endpunkt der einen Streckendefinition, der Endpunkt entspricht dem Koppelpunkt einer anderen Streckendefinition. Bei einer Verschiebung des Start- oder Endpunktes wird sich durch die festgelegte geometrische Form der Primitive ein Krümmungssprung am Anfangs- und Endpunkt ergeben. Diese Unstetigkeit wird in einer Warnmeldung dem Benutzer angezeigt.

4.7.7 Software zu Erstellung von Streckendefinitionen

Ziel des Streckengenerators ist die Erstellung einer railML-Szenario-Konfigurationsdatei mit einer vollständigen Szenariodefinition, bestehend aus Streckendefinition und Fahrplan (siehe Abschnitt 4.7.8). Die manuelle Erstellung der Datei ist möglich, aber da deren Daten und Struktur sehr komplex sind, ist dies nicht praktikabel. Daher werden die Daten zur Charakterisierung der zu erstellenden Strecke in einer benutzerfreundlichen Weise eingegeben. In einer automatischen Werkzeugkette wird daraus die railML-Datei erzeugt. In einer Konfigurationsdatei wird die zu verwendende Szenariodefinition der Simulationsumgebung über den Dateipfad zur railML-Datei konfiguriert. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Software in MATLAB erstellt, die aus einer Streckendefinition eine railML-Datei erzeugt.

Jede Primitive in der Streckendefinition wird durch einen Funktionsaufruf in einem MATLAB-Skript erzeugt. Der Funktionsaufruf (Abb. 27) beschreibt die geometrische Form und die Art des Parametersatzes. Die Funktion berechnet die weiteren Parameter der Primitive und legt die Datenstruktur des Primitive-Datensatzes an. Die Datenstruktur der neuen Primitive wird an die Datenstruktur der Streckendefinition angehängen.

```

37 - PCW = Kreisbogen_Pkt_Laenge( ...
38     PCW, { 'T1_Gleis_110' 'Bogen_1' }, { 'StartPunkt_T1' 'trackBegin' }...
39     , 700, 150, 133.069 , 1223.340 , 'add', 80*km2ms ) ;
40
41 - PCW = Kreisbogen_Pkt_Laenge( ...
42     PCW, { 'T1_Gleis_110' 'Bogen_2' }, { 'T1_Gleis_110' 'Bogen_1' 'trackEnd' }...
43     , 700, 150, 133.086 , 150.780 , 'add', 80*km2ms ) ;
44

```

Abb. 27: MATLAB-Skript zur Konfiguration der in Abb. 28 dargestellten Primitive

Die Streckendefinition in MATLAB (Abb. 28) besteht aus einer hierarchischen Datenstruktur, in der alle vorhandenen Informationen der Primitiven konzentriert sind. Die oberste Hierarchieebene listet die Gleisnetzabschnitte auf. In der Hierarchieebene darunter werden die Gleise des Gleisnetzabschnittes und darunter zu jedem Gleis die daraus bestehenden Primitiven (mit ihrem Primitive-Datensatz) angeordnet. Die tieferen Hierarchieebenen speichern die Eigenschaften der jeweiligen Primitive.

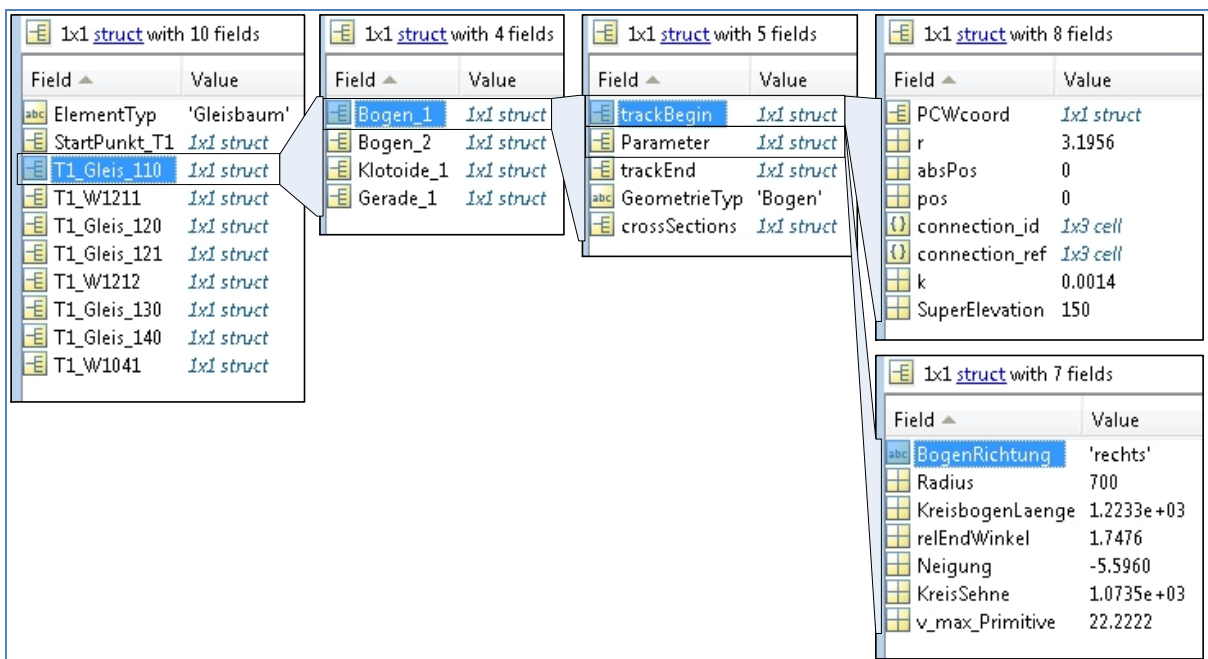


Abb. 28: Streckendefinition als MATLAB-Workspace Struktur

Die Datenstruktur einer Primitive wird durch eine Template-Funktion in MATLAB-Skript erzeugt. Der Benutzer kann mit der Aneinanderreihung und Konfiguration der Template-Funktionen (Abb. 27) eine Streckendefinition erstellen.

In einer rekursiven Funktion werden alle Hierarchieebenen der Streckendefinition im MATLAB-Workspace abgearbeitet und als railML-Datenstruktur gespeichert. So ist das Datenformat der Streckendefinition im MATLAB-Workspace frei wählbar und kann alle verfügbaren Daten in der für die Software günstigsten Struktur aufnehmen. Das railML-Format dient zum standardisierten Datenaustausch.

4.7.8 Szenariodefinition aus Strecke und Fahrplan

Zur Beschreibung einer Bewegung gehören das örtliche und das zeitliche Verhalten eines Objektes. Während im vorangegangenen Abschnitt die möglichen Fahrwege durch die Streckendefinition festgelegt wurden, soll nun durch die Definition eines Fahrplanes die zeitliche Bewegung beschrieben werden.

Ein Fahrplan besteht aus einer Abfolge von Betriebsstellen (OCPs, Operation Control Points), an denen sich ein Objekt zu einem bestimmten Zeitpunkt befindet. Betriebsstellen können Bahnhöfe, Bahnübergänge, oder andere markante oder sinnvolle Orte entlang der Gleise sein. Eine Betriebsstelle wird als eine zusätzliche Eigenschaft einer Primitive aufgefasst, hat einen eindeutigen Namen und wird mit einer relativen Kilometrierung innerhalb der Primitive positioniert. Da der Fahrweg zwischen zwei Betriebsstellen nicht eindeutig sein muss, wird die Abfolge aller zu befahrenden Primitiven zusätzlich angegeben. Der Fahrplan steht ebenfalls in der railML-Datei.

4.7.9 Benutzeroberfläche Szenario-Viewer

Die Web-Anwendung „Szenario-Viewer“ (Abb. 29) dient der Darstellung von Streckendefinitionen aus railML-Dateien. Die Streckendefinition wird auf Landkarten oder Satellitenbilder von im Internet verfügbaren Kartendiensten angezeigt. Die in der railML-Datei enthaltenen Primitiven werden auf der linken Seite in einer hierarchischen Baumstruktur dargestellt. Auf der rechten Seite werden die Parameter angezeigt. Der „Szenario-Viewer“ wird zur Kontrolle und Fehlersuche bei der Entwicklung neuer Streckendefinitionen eingesetzt.

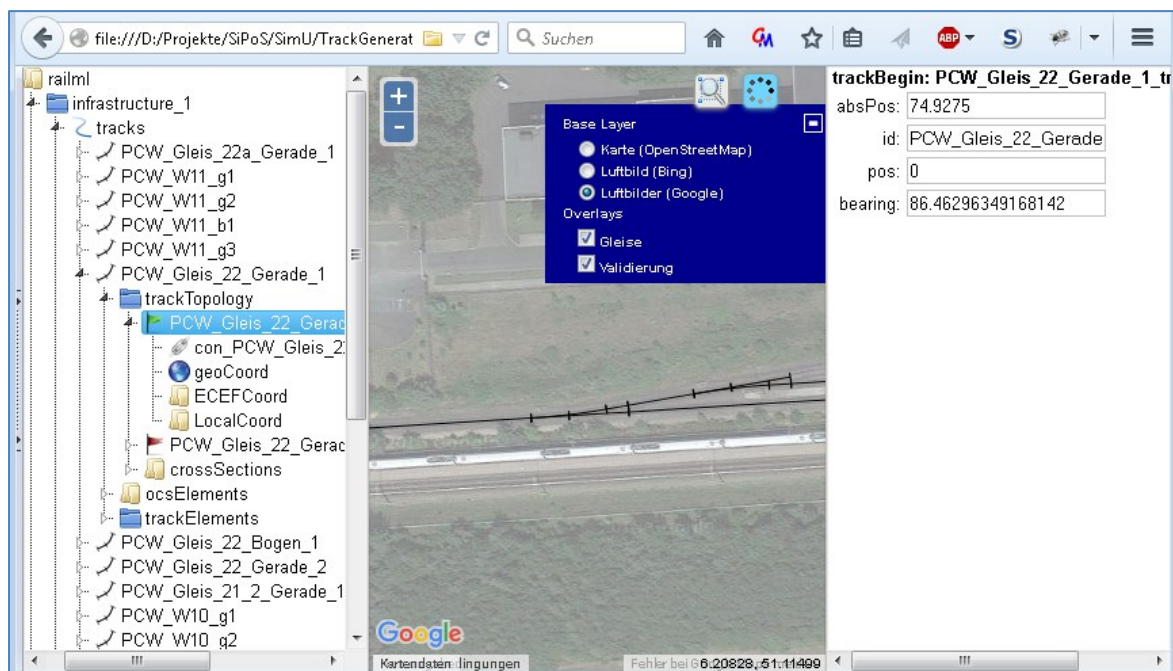


Abb. 29: Szenario-Viewer mit geladener Streckendefinition (PCW 20er-Gleise)

5 Modellbeschreibung

Das fünfte Kapitel fasst die verwendeten physikalischen und technischen Modelle in der Simulationsumgebung zusammen.

Abschnitt 5.1 stellt alle Simulationsmodelle der Eisenbahninfrastruktur, des Schienenfahrzeuges und der Umgebung in der Simulationsumgebung entlang des Signalflusses vor.

Die Simulationsumgebung wird in Abschnitt 5.2 zu einer Software-in-the-Loop-Simulation erweitert.

Abschnitt 5.3 beschreibt die Modell- und Programmstrukturen der Eisenbahninfrastrukturmodelle, die während eines Simulationslaufes von einem Python-Server ausgeführt werden. Die Eisenbahninfrastrukturmodelle erzeugen die Bewegungsvorgabe des Schienenfahrzeuges. In einer verallgemeinerten Struktur werden die Funktionalitäten der Fahrweg- und Fahrzeitvorgabe durch ein Leitstellenmodell und das Legen und Sichern des Fahrweges durch ein Stellwerksmodell umgesetzt.

Das Zugleit- und Zugsicherungssystem ERTMS/ETCS ist das Bindeglied zwischen der Eisenbahninfrastruktur und dem Schienenfahrzeug und wird in Abschnitt 5.4 zur tieferen Analyse des ETCS-Systems und dessen Zusammenwirken mit anderen Fahrzeugsystemen vorgestellt.

Die folgenden Abschnitte beschreiben die Schienenfahrzeugkomponenten als Submodelle entlang des Signalflusses im Simulink-Zentralmodell. Das Triebfahrzeugführermodell in Abschnitt 5.5 erhält die Fahrbefehle des ETCS-Systems und setzt diese als ein Quasi-Autopilot in eine Bewegungsvorgabe für das Zentralsteuergerät um. Das Fahrzeug-Zentralsteuergerätemodell in Abschnitt 5.6 steuert (unter anderem) die Fahrzeugtechnikmodelle zur Bewegungsänderung an. Die Fahrzeugtechnikmodelle und Bewegungsmodelle in Abschnitt 5.7 erzeugen die eindimensionale Bewegung des Schienenfahrzeuges auf dem Fahrweg.

An das Simulink-Zentralmodell ist eine Mehrkörpersimulation in SIMPACK gekoppelt, die aus der eindimensionalen Fahrzeugbewegung eine dreidimensionale Bewegung erzeugt. Abschnitt 5.8 beschreibt die verschiedenen Schienenfahrzeug-Mehrkörpermodelle.

Aus den verfügbaren physikalischen Signalen aller vorangegangenen Modelle sind ab Abschnitt 5.9 Sensorikmodelle beschrieben. Nach den konventionellen eindimensionalen Sensormodellen in Abschnitt 5.10 werden die umgebungsfeste

Wegmarkensensorik in Abschnitt 5.11 und die fahrzeugfeste 3D-Sensorik in Abschnitt 5.12 dargestellt. Als ein verteiltes und besonders aufwendiges Sensorsystem beschreibt Abschnitt 5.13 das Satellitennavigationsmodell mit Rohdatengenerierung. Nach der Berechnung der Satellitenpositionen des Weltraumsegmentes werden im Empfänger (Benutzersegment) die funktionalen Empfangssignale zu jedem Satelliten berechnet.

Abschnitt 5.14 beschreibt die in den Simulationsszenarien verwendeten Streckendefinitionen der IFS-Rangiergleise (Universität RWTH Aachen) und des Prüf- und Validationcenters in Wildenrath.

5.1 Das Schienenfahrzeugmodell und das Simulink-Zentralmodell

Das Schienenfahrzeugmodell fasst die grundlegenden Eigenschaften und Strukturen eines Schienenfahrzeuges zusammen. Solche Fahrzeugmodelle bestehen aus mechanischen und fahrzeugtechnischen sowie aus elektronischen und informationstechnischen Teilen und werden für die aktuelle Themenstellung in geeigneter Modellierungstiefe implementiert. Die generische Simulationsarchitektur erzeugt das Grundgerüst eines Informationsflusses, der unzulässige Vereinfachungen vermeidet.

Durch die vorhandenen Strukturelemente wird ein Benutzer veranlasst, eine neu zu erstellende Funktionalität bereits vor der Implementierung einem Strukturelement (oder bei verschiedene Teilfunktionalitäten mehreren Strukturelementen) des Simulationsmodells zuzuordnen. Dies unterstützt die spätere Implementierung auf einer Zielhardware und erhöht die Praxisnähe und Akzeptanz einer Prototypenlösung. Gleichzeitig wird die Komplexität des Modells durch diese Strukturierung verringert.

Die in dem Simulationsmodell enthaltenen Strukturelemente sind als abgegrenzte Module modelliert. Jedes Modul lässt sich durch unterschiedliche Implementierungen mit spezifischen Eigenschaften und Detaillierungsgrad ersetzen. Die Schnittstellen der Module untereinander bilden den grundlegenden Informationsfluss zwischen den Modulen ab. Jedoch können Module mit einem höheren Detaillierungsgrad auch eine erweiterte Schnittstelle bereitstellen. Sie benötigen gegebenenfalls zusätzliche Eingangssignale oder Parameter. Dies ist im Gesamtmodell dem jeweiligen Bearbeitungsthema anzupassen.

Soweit Schnittstellen durch Normen oder öffentlich zugängliche Spezifikationen beschrieben werden, sind diese Schnittstellen- oder Funktionsbeschreibungen in der Simulationsumgebung bevorzugt implementiert. Dies wurde an den Steuergeräten des ETCS-Systems konsequent umgesetzt.

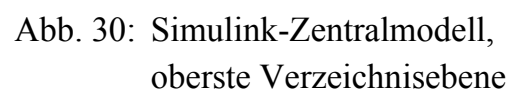
Schnittstellen- oder Funktionsbeschreibungen können sehr umfangreich sein. Deshalb beschränkt sich die Implementierung auf die zur Nachbildung des Referenzfahrzeuges notwendige Funktionalität. Jedoch lassen sich von dieser Grundstruktur ausgehend weitere Teile der Spezifikation als Erweiterung einbinden. Dies verringert den Unterschied zwischen dem Modell und im realen Eisenbahnbetrieb produktiv eingesetzten Systemen.

Das Schienenfahrzeugmodell umfasst die Einrichtungen auf dem Schienenfahrzeug. Es wird gegliedert in folgende Komponenten oder Module: Fahrer (Triebfahrzeugführer, als Autopilot), Steuergeräte, eindimensionale Fahrzeugtechnik (Traktion und Bremse), eindimensionales Bewegungsmodell, dreidimensionales Bewegungsmodell sowie ein- und mehrdimensionale Sensorik. Zu jedem Modul gibt es eine oder mehrere Implementierungen, die im Folgenden beschrieben werden.

Bis auf das dreidimensionale Bewegungsmodell sind alle Module im Simulink-Zentralmodell implementiert. Das dreidimensionale Bewegungsmodell wurde aufgrund seiner besonderen Eigenschaften und Komplexität in ein Mehrkörpersimulationsprogramm ausgelagert und über eine Co-Simulationsschnittstelle an das Simulink-Zentralmodell gekoppelt.

Die erlaubte Bewegung des simulierten Schienenfahrzeuges wird durch Fahrtfreigaben des ETCS-Systems vorgegeben. Ein Fahrermodell setzt die Fahrtfreigaben in Fahranforderungen an das Schienenfahrzeug um.

Aus der Anordnung der Module (und den Schnittstellen zwischen den Modulen) des Fahrzeugmodells ergibt sich die Struktur des Informationsübergangs auf dem hier beschriebenen Schienenfahrzeug. Die einzelnen Module können je nach Art des Systems ereignisbasiert, getaktet oder kontinuierlich ausgeführt werden. Die Software auf Steuergeräten wird in diskreten Zeitabständen oder ereignisgesteuert ausgeführt. Physikalische Modelle von Systemen arbeiten mit einer kontinuierlichen Zeitbasis oder mit einer hohen getakteten Zeitbasis.



In Abb. 30 ist die oberste Ebene des Simulink-Zentralmodells dargestellt. Der Informationsfluss beginnt auf der linken Seite mit dem ETCS-Fahrzeugsteuergerät („ETCS_OBU“, Abschnitt 5.4), das über das Schnittstellenmodul („Receive RBC-Data“, Abschnitt 5.4.2) die ETCS-Nachrichten der ETCS-Streckenzentrale erhält. Zusätzlich werden die Sensordaten des vorangegangenen Ausführungsschrittes als Eingangsdaten genutzt. Die vom ETCS-Fahrzeugsteuergerät erzeugten ETCS-Nachrichten sendet das Subsystem „Send2RBC“ über eine Ethernetverbindung (Socket) an die ETCS-Streckenzentrale. Das ETCS-Anzeigegerät „Driver Machine Interface“-Modul ist die Schnittstelle des ETCS-Systems zum Triebfahrzeugführermodell („Driver“, Fahrermodell, Abschnitt 5.5). Die virtuell angezeigten Daten übergibt das ETCS-Anzeigegerät in einem Simulink-Bus. Das Fahrermodell führt die Befehle des ETCS-Systems aus und erzeugt einen Beschleunigungswunsch, den er durch Bedienhandlungen an einem Fahrerstand dem Zentralsteuergerät („Central Control Unit“, Abschnitt 5.6) mitteilt. Die Verarbeitung aller zentralen Fahrzeugfunktionalitäten ist im Zentralsteuergerät zusammengefasst. Die Ansteuerung von Motor und Bremse durch das Zentralsteuergerät setzt das Fahrzeugtechnik-Modul („vehicle technology“, Abschnitt 5.7) in eine eindimensionale Bewegung des simulierten Schienenfahrzeuges um. Die Transformation von einer eindimensionalen Bewegung in eine dreidimensionale Bewegung führt eine Mehrkörpersimulation (Abschnitt 5.8) durch, die über eine Co-Simulationsschnittstelle im Subsystem „MBS Vehicle“ mit dem Simulink-Zentralmodell verbunden ist.

Die absolute Position der für die Satellitennavigation verwendeten Satelliten wird im GNSS-Weltraumsegment „GNSS Space Segment“ als einem unabhängigen Umgebungsmodell berechnet.

Im Sensormodell „Sensor (Error) Module“ sind die Sensormodelle aller auf dem simulierten Schienenfahrzeug vorhandenen Sensoren zusammengefasst. Die Sensormodelle erzeugen aus den bisher berechneten physikalischen Zuständen die für einen Sensor charakteristischen Sensorsignale, wie sie von einem realen Messdatenerfassungssystem gemessen würden. Die Sensorsignale werden von den Fahrzeugsystemen wieder eingelesen. Der Ausgang „EPT_Sensor_Bus“ fasst die Sensorsignale in einer definierten Datenstruktur zusammen, wie sie auf dem zentralen Echtzeitsystem des Referenzfahrzeuges „IFS-Erprobungsträger 1“ allen Applikationen zur Verfügung gestellt wird. An dieser Schnittstelle lässt sich die Simulationsumgebung als Software-in-the-Loop-Testumgebung für diese Applikationen nutzen.

Während einer Teilsimulation wird die Simulink-Oberfläche mit dem ausgeführten Modell (Abb. 30) für den Benutzer sichtbar geöffnet. Über Anzeigen und Diagramme lassen sich Variablenzustände und die Simulationszeit überwachen.

5.2 Software-in-the-Loop-Architektur und Schnittstelle zum Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“

Auf dem zentralen Echtzeitrechner (dSPACE-/RCP-System) des IFS-Erprobungsträgers (Anhang A.3) werden in MATLAB-Bibliotheken festgelegte Datenstrukturen (Hardware-Bus, Sensor-Bus) zur strukturierten Übergabe von Messdaten verwendet (siehe Abb. 117). Diese Busdefinitionen werden von der Simulationsumgebung eingelesen. Abb. 31 stellt die Softwarearchitekturen gegenüber.

Der „Hardware-Bus“ fasst alle Sensorsignale zusammen, wie sie an den Messkarten des RCP-Systems anliegen. Seine Busstruktur spiegelt die eingebaute Hardware mit den Messkanälen wieder. Eine konzentrierte Online-Messdatenverarbeitung („Input“-Subsystem) bereitet die Sensorrohdaten des „Hardware-Bus“ zu den physikalischen Sensorsignalen in SI-Einheiten auf. Die Busstruktur des „Sensor-Bus“ entspricht den eingebauten Sensoren und deren Messsignalen. Alle Applikationen auf dem RCP-System sind an den „Sensor-Bus“ angeschlossen.

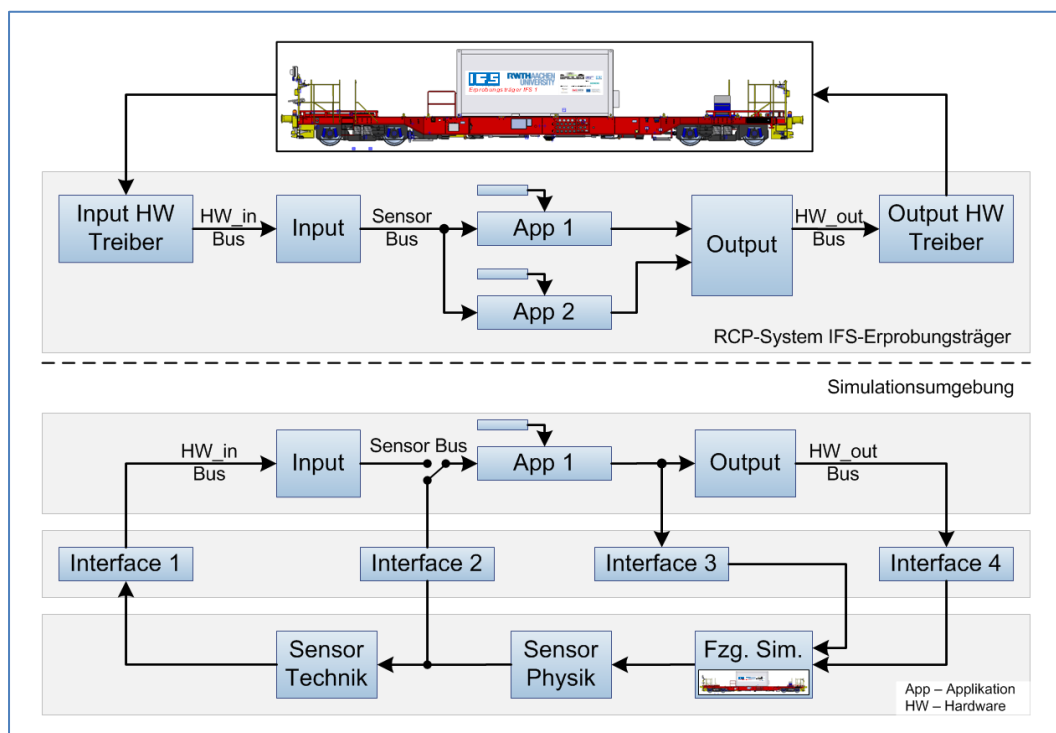


Abb. 31: Signalfluss des RCP-Systems auf dem realen IFS-Erprobungsträger (oben) und der SiL-Architektur in der Simulationsumgebung (unten)

In der Simulationsumgebung fasst ein Schnittstellenmodell (Interface 2) die simulierten Messdaten zum Sensor-Bus zusammen. Der Sensor-Bus ist somit eine identische Softwareschnittstelle zu Applikationen auf dem realen Schienenfahrzeug und in der Simulationsumgebung. Die Simulationsumgebung stellt für diese

Schnittstelle ein komplexes Umgebungsmodell mit realitätsnahen Systemverhalten bereit. Eine an diese Schnittstelle angeschlossene (Software-)Anwendung kann in der Simulationsumgebung in einer Software-in-the-Loop-Architektur entwickelt werden. Die Anwendung ist auf dem RCP-System des IFS-Erprobungsträgers, ohne Änderungen an der Schnittstelle, für praktische Tests nutzbar.

5.3 Software-Module zur Eisenbahninfrastruktur

Als aktive Eisenbahninfrastruktur werden hier die Systeme aufgefasst, die aktiv den Betriebsablauf des Eisenbahnverkehrs steuern. Im realen Schienenverkehr hat sich eine Aufgabenteilung zwischen Leitsystemen, Stellwerk und Zugsicherung etabliert. Durch diese Funktionstrennung wird die Komplexität des Infrastrukturgesamtsystems reduziert.

In dieser Simulationsumgebung werden die grundlegenden Strukturelemente der Schienenverkehrinfrastruktur angelegt. Dies bietet die Möglichkeit, den Informationsfluss zwischen den Systemen (in der notwendigen Detailtiefe) zu modellieren und die Grundstruktur für spätere Detaillierungen bereits anzulegen. Die Infrastruktursysteme weisen einen hohen Anteil an ereignisgesteuerter Logik und objektbasierten Zuständen auf. Daher ist dieser Teil der Simulationsumgebung in der objektorientierten Programmiersprache Python ausgeführt.

Als Zugleit- und Sicherungssystem wird ERTMS/ETCS gewählt. Bevorzugt wird die Spezifikation „Baseline 3“ [6] verwendet, jedoch muss teilweise auf die „Baseline 2“ [5] zurückgegriffen werden.

Zu Beginn des Simulationsdurchlaufes startet die Szenariosteuerung den mit einer railML-Datei konfigurierten Streckenatlas-Server. Die Strecken- und Fahrplandaten sind in einer Python-Objektstruktur und als Datenbank abgelegt. Daraufhin werden die Python-Objekte Leitstelle, Stellwerk und ETCS-Streckenzentrale (Radio Block Center, RBC) angelegt. Alle Objekte greifen auf eine gemeinsame Python-Objektstruktur und eine damit verknüpfte Datenbank mit Strecken- und Fahrplandaten zu.

Die Systeme des Zuges sind in einem vollständig initialisierten Zustand, sodass keine zusätzlichen Initialisierungsvorgänge durchgeführt werden müssen. Das ETCS-System ist im Zustand ETCS Level 2, Modus FS „Full Supervision“. Damit wird der Funktionsumfang der einzelnen ETCS-Systeme auf den für die Steuerung des Schienenfahrzeuges in der Simulation notwendigen Umfang reduziert.

Als unabhängig ausgeführter Python-Server hat die ETCS-Streckenzentrale eine Datenverbindung zum ETCS-Fahrzeugsteuergerät im Simulink-Zentralmodell. Dies lässt sich als eine Co-Simulationsschnittstelle zwischen der Infrastruktursimulation in

Python und der Schienenfahrzeugsimulation in MATLAB/Simulink interpretieren. Die Datenverbindung stellt eine Ethernetverbindung (Socket) her, in der Ethernet-Pakete mit ETCS-Botschaften übertragen werden. Dies ersetzt in der Simulationsumgebung das in der Praxis verwendete GSM-R-System mit dem EURORADIO-Protokoll.

Die Infrastrukturobjekte und die Simulink-Simulation werden asynchron voneinander ausgeführt. Während die Infrastrukturobjekte in der aktuellen Implementierung eine rein ereignisgesteuerte Logik beinhalten, wird das ETCS-Fahrzeugsteuergerät im Simulink-Zentralmodell mit einer festen Taktzeit ausgeführt. Die Ethernetübertragung vom ETCS-Fahrzeugsteuergerät zur Infrastruktur, die dort stattfindende Verarbeitung und die daraus generierten Antworten sind nicht miteinander synchronisiert. Dies ist ein praxisnahes Systemverhalten, führt jedoch auch dazu, dass in den Wiederholungen des Simulationsdurchlaufes des identischen Szenarios die Datenübertragung zwischen den ETCS-Systemen zwar zeitlich sehr ähnlich ist, sich aber nicht identisch auf den Systemtakt des ETCS-Fahrzeugsteuergerätes reproduzieren lässt.

Aus dem Fahrplan und den Streckeneigenschaften wird in der ETCS-Streckenzentrale ein maximales Geschwindigkeitsfahrprofil für den Zug erstellt und an das ETCS-Fahrzeugsteuergerät übertragen. Die Bewegungsvorgabe für das Schienenfahrzeug in der Simulation bezieht sich auf die absolute Position auf der Strecke und ist unabhängig von dem Zeitpunkt, zu dem das Geschwindigkeitsprofil an das Fahrzeug übertragen wurde. Somit ist die Schnittstelle des ETCS-Fahrzeugsteuergerätes zum restlichen Simulink-Zentralmodell (wie alle weiteren Teile des Simulink-Zentralmodells) deterministisch.

In der aktuellen Implementierung sollen die Versuchsfahrten des Referenzfahrzeuges „IFS-Erprobungsträger 1“ untersucht werden. Daraus ergeben sich Vereinfachungen für die Komponenten Stellwerk und Leitstelle.

5.4 ETCS-Fahrzeugausrüstung

Die ETCS-Fahrzeugausrüstung besteht in der Simulationsumgebung aus zwei Steuergeräten. Das zentrale ETCS-Fahrzeugsteuergerät (ETCS Onboard Unit, ETCS-OBU), in dem alle für das Schienenfahrzeug notwendigen ETCS-Funktionalitäten und technischen Schnittstellen konzentriert sind. Das ETCS-Anzeige- und Eingabegerät (Driver Machine Interface, ETCS-DMI) stellt die Benutzerschnittstelle zum Triebfahrzeugführer dar.

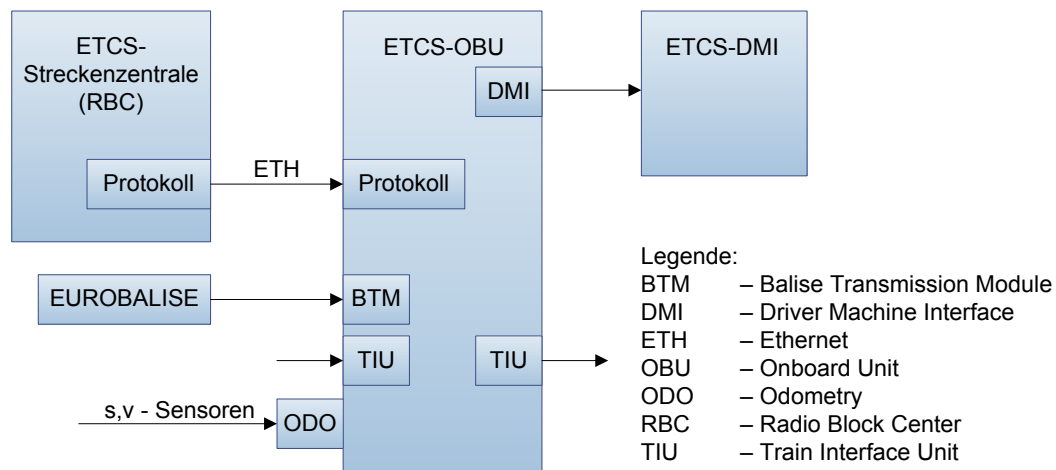


Abb. 32: Funktionale Schnittstellen der ETCS-Fahrzeugausrüstung

Die folgenden Abschnitte stellen die Funktionalitäten und Schnittstellen der in der Simulationsumgebung implementierten ETCS-Fahrzeugausrüstung (Abb. 32) einzeln vor.

5.4.1 ETCS-Fahrzeugsteuergerät (On-board Unit, ETCS-OB)

Das Modell des ETCS-Fahrzeugsteuergerätes wird im Simulink-Zentralmodell in einem Submodell „ETCS_OB“ auf der obersten Modellebene zusammengefasst. In Abb. 30 sind die externen Schnittstellen des Subsystems dargestellt. Die Position des Modells auf der linken Seite im Simulink-Zentralmodell repräsentiert den Anfang des Datenflusses. So gibt das ETCS-System das Bewegungsprofil vor und leitet es über das ETCS-Anzeige- und Eingabegerät an das Fahrermodell weiter.

Alle rückgekoppelten Signale werden durch 1/z-Blöcke geleitet, um die im vorangegangenen Berechnungsschritt ermittelten Ergebnisse in diesem Berechnungsschritt zur Verfügung zu stellen. So werden algebraische Schleifen vermieden.

Die Software des ETCS-Fahrzeugsteuergerätes wird, wie bei einem Steuergerät üblich, mit einer festen Taktzeit ausgeführt. Zur Vereinfachung entspricht die Taktzeit der im Simulink-Zentralmodell verwendeten Taktzeit. Durch „Rate Transition“-Blöcke als Trennung zwischen dem ETCS-OB Task und dem Task des restlichen Simulink-Zentralmodells sind unabhängige Taktzeiten vorgebar.

In dem getakteten Softwareteil werden vor allem die kontinuierlichen Überwachungsaufgaben des ETCS-Systems ausgeführt, was in der aktuellen Implementierung hauptsächlich der Geschwindigkeitsüberwachung durch die Bremskurven entspricht.

Der ereignisbasierte Softwareteil ist notwendig, um neue Botschaften der ETCS-Streckenzentrale oder eine neu ausgelesene ETCS-Eurobalise ressourcenschonend zu verarbeiten. Diese diskreten Ereignisse führen zum einmaligen Ausführen dieser Submodelle. An der Schnittstelle zwischen dem ereignisbasierten und dem

getakteten Softwareteil wird durch Simulink ein Zwischenspeicher angelegt, der die aktuellsten Ergebnisse des ereignisbasierten Softwareteils dem getakteten Softwareteil zu jedem Ausführungsschritt zur Verfügung stellt.

Das Modell des ETCS-Fahrzeugsteuergerätes hat eine bidirektionale Verbindung über Ethernet (UDP, Socket) zu dem Python-Server der ETCS-Streckenzentrale (ETCS-RBC, Abschnitt 5.4.2). Für die Kommunikation sind im Simulink-Zentralmodell noch zwei Submodelle „Send 2 RBC“ und „Receive RBC Data“ vorhanden, um die Simulink-Hardwareschnittstelle von der Implementierung der Funktionalität des ETCS-Fahrzeugsteuergerätes zu trennen.

5.4.2 Schnittstelle zur ETCS-Streckenzentrale

Die Kommunikation zwischen ETCS-Fahrzeugsteuergerät und der ETCS-Streckenzentrale findet über das in der ETCS-Spezifikation SUBSET-026, Abschnitt 7/8 beschriebene Protokoll statt. Darin werden aus standardisierten Variablen die ebenfalls standardisierten Datenpakete zusammengesetzt. Die verwendeten Botschaften bestehen aus einem Header und Datenpaketen. Der Übertragungsstandard für ETCS-Botschaften EURORADIO nach SUBSET-037 wird vereinfacht, indem die nach SUBSET-026 kodierten Botschaften als Nutzdaten in einem Ethernetpaket übertragen werden. Zur Fahrzeugsteuerung findet in der Simulationsumgebung folgende Kommunikation statt:

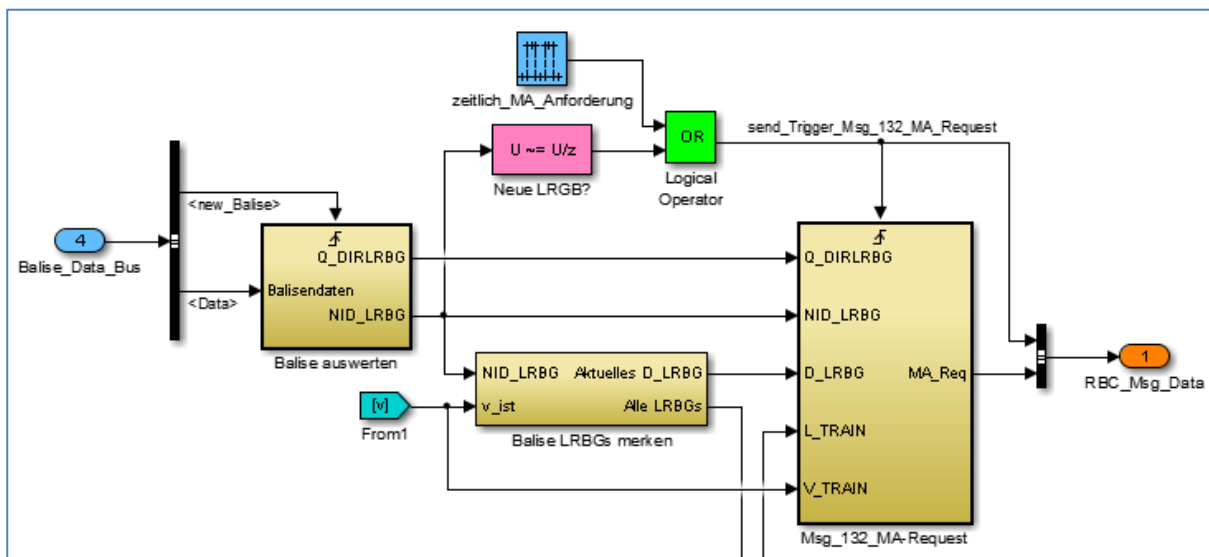


Abb. 33: Detail des Subsystems ETCS_OBU im Simulink-Zentralmodell zur Erzeugung eines „MA_Request“-Botschaft

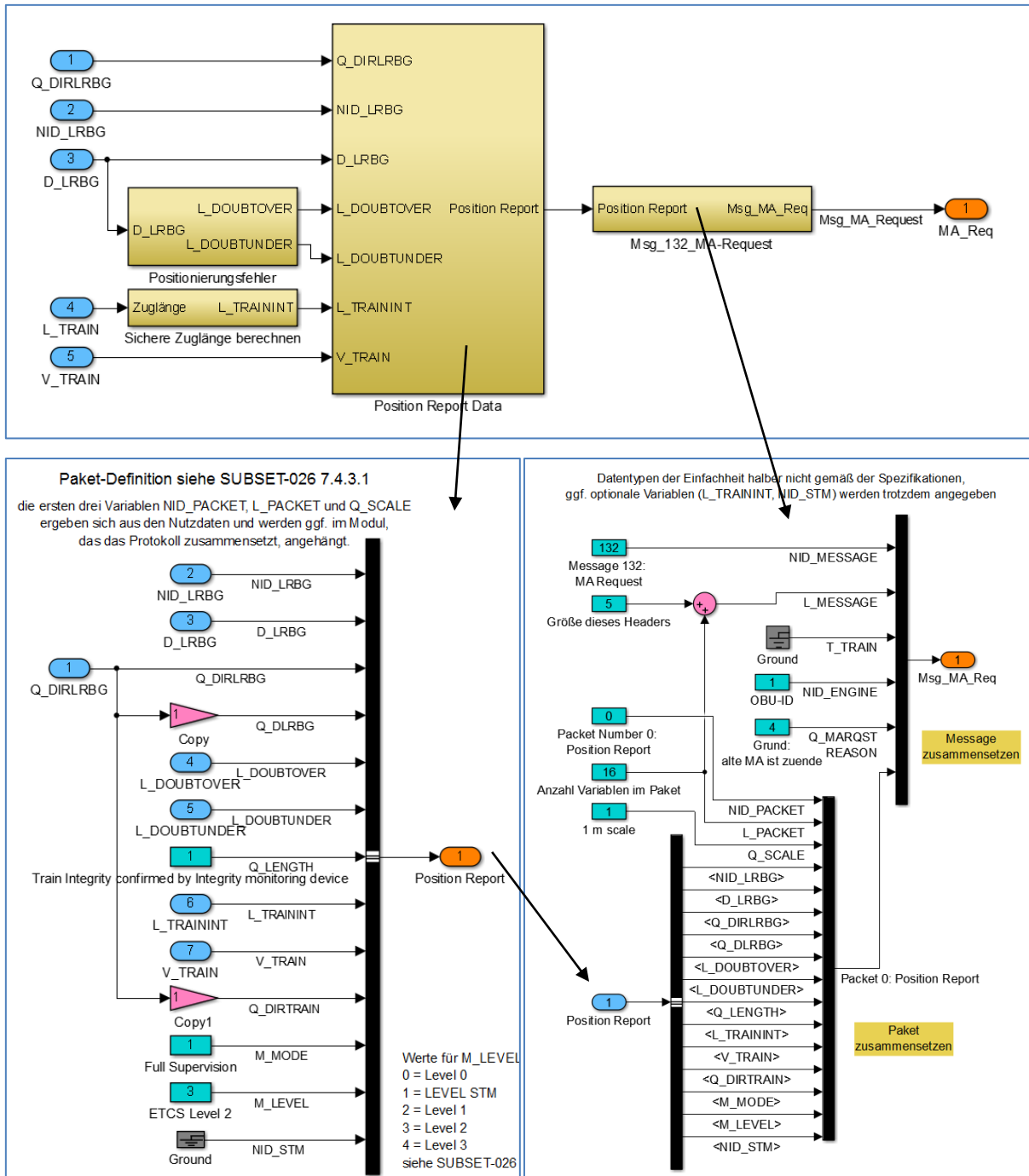


Abb. 34: Detail des in Abb. 33 dargestellten Simulink-Subsystem „Msg_132_MA-Request“ zur Erzeugung der Datenstruktur der „MA-Request“-Botschaft

Das ETCS-Fahrzeugsteuergerät sendet eine Botschaft „MA_Request“ an die ETCS-Streckenzentrale und fordert darin eine „Movement Authority“-Botschaft an. Die Anforderungsbotschaft „MA_Request“ enthält den Header sowie das optionale Paket „Position Report“. Somit ist der ETCS-Streckenzentrale die aktuelle Position des Zuges bekannt, woraus eine neue Streckenfreigabe berechnet wird.

In der an das ETCS-Fahrzeugsteuergerät zurück gesendeten Botschaft befindet sich die Fahrtfreigabe als „Movement Authority“-Paket. Zusätzlich enthält die Botschaft das „Static Speed Profile“-Paket (SSP), das das wegabhängige Profil der erlaubten Höchstgeschwindigkeiten für diesen Zug enthält.

Dieser Zyklus wird in regelmäßigen Abständen, z.B. jede Sekunde, und bei besonderen Ereignissen, z.B. bei Überfahrt einer ETCS-Balisengruppe, ausgelöst.

Der Signalfluss innerhalb des ETCS-Fahrzeugsteuergerätes zur Verarbeitung der Balisendaten und der Erzeugung der „MA-Request“-Botschaft ist in Abb. 33 und Abb. 34 dargestellt. Abb. 34 zeigt die Implementierung des Simulink-Subsystem „Msg_132_MA-Request“ im Detail. Die Signalnamen entsprechen den in SUBSET-026 definierten Variablennamen. Im Subsystem „Send2RBC“ des Simulink-Zentralmodells (siehe Abb. 30) wird die Datenstruktur als Ethernetpaket an die ETCS-Streckenzentrale gesendet. Die sich in Abb. 33 im Bild nach unten anschließende Implementierung ist in Abb. 38 dargestellt.

5.4.3 ETCS-Anzeige- und -Eingabegerät (Driver Machine Interface, ETCS-DMI)

Das „ETCS Driver Machine Interface“ ist das Anzeige-, Führerstandssignalisierung- und Eingabegerät der ETCS-Fahrzeugausrüstung. Auf der vom ETCS-Fahrzeugsteuergerät unabhängigen Anzeige (Abb. 5) werden alle für den Triebfahrzeugführer relevanten Informationen zur operativen Situation des Schienenfahrzeuges in Bezug auf das ERTMS/ETCS-System angezeigt. In Abb. 35 ist das Simulink-Modell des ETCS-DMI dargestellt.

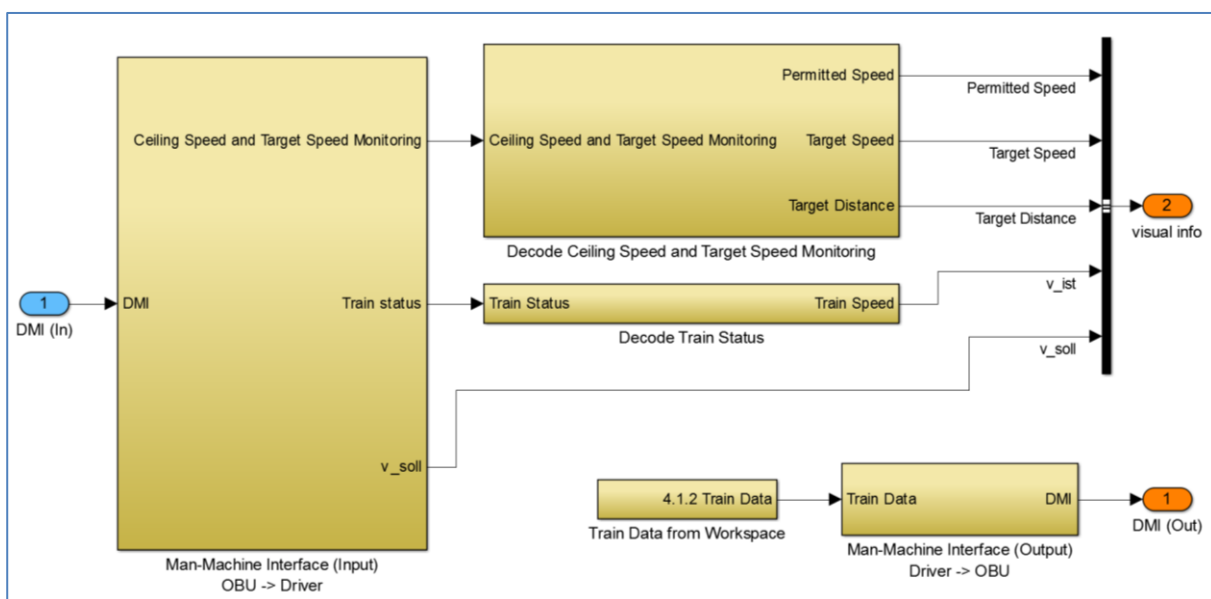


Abb. 35: Simulink-Submodell des ETCS Driver Machine Interface

Darin werden an dem linken Eingang „DMI (in)“ die Signale des ETCS-Fahrzeugsteuergerätes eingelesen, in der Mitte die Signale verarbeitet und auf der rechten Seite die für das Fahrermodell notwendigen Anzeigesignale am Ausgang „visual info“ ausgegeben. Der Ausgang „DMI (Out)“ führt die (hier statischen) Eingabedaten des Fahrermodells an das ETCS-Fahrzeugsteuergerät zurück.

Die Kommunikation zwischen dem ETCS-Fahrzeugsteuergerät und dem ETCS-DMI ist durch die ETCS-Spezifikation Baseline 2 SUBSET-033 Abschnitt 4 definiert. Die auf dem ETCS-DMI angezeigten Daten beschreibt die Spezifikation (Baseline 3) ERA ERTMS 015560. Hiervon werden jedoch (zur Vereinfachung von der Spezifikation abweichend) nur die fünf in Abb. 35 rechts dargestellten Signale an das Fahrermodell übertragen.

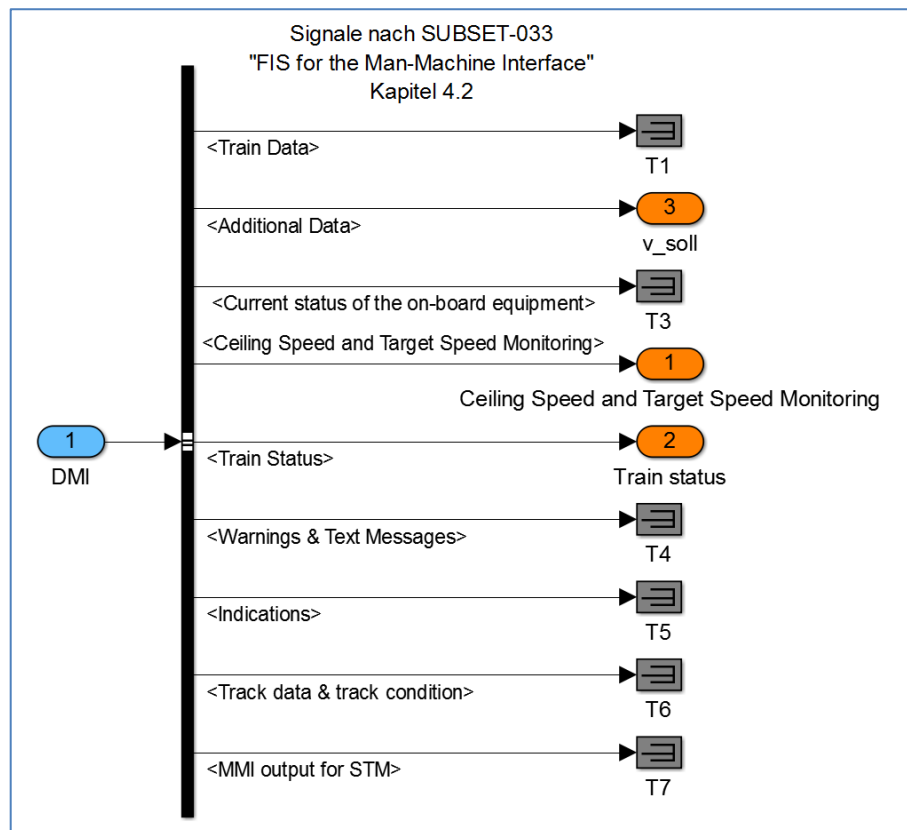


Abb. 36: An das ETCS-DMI gesendete Datenstruktur des ETCS-Fahrzeugsteuergerätes als Simulink-Bus im Subsystem „Man-Machine Interface (Input)“

Das ETCS-DMI hat ausschließlich eine bidirektionale Datenverbindung zum ETCS-Fahrzeugsteuergerät. So kann das ETCS-Fahrzeugsteuergerät dem ETCS-DMI die für die Anzeige notwendigen Daten mit aktuellen Zustandsinformationen senden. Hierzu wurde die in ETCS-Spezifikation Baseline 2 SUBSET-033 Abschnitt 4.2

beschriebenen Datenstruktur in einem Simulink-Bus (Abb. 36) angelegt und die für die Funktionalität notwendigen Variablen weiter geführt.

Der Triebfahrzeugführer wird in der Simulation durch ein Fahrermodell (siehe Abschnitt 5.5) ersetzt. Daher werden die vom ETCS-DMI angezeigten Daten in einem Simulink-Bus an das Fahrermodell gesendet. Dies soll dem Ablesen der auf dem ETCS-DMI angezeigten Daten durch den Triebfahrzeugführer entsprechen. Das ETCS-DMI sendet dem ETCS-Fahrzeugsteuergerät Eingabedaten des Triebfahrzeugführers zurück.

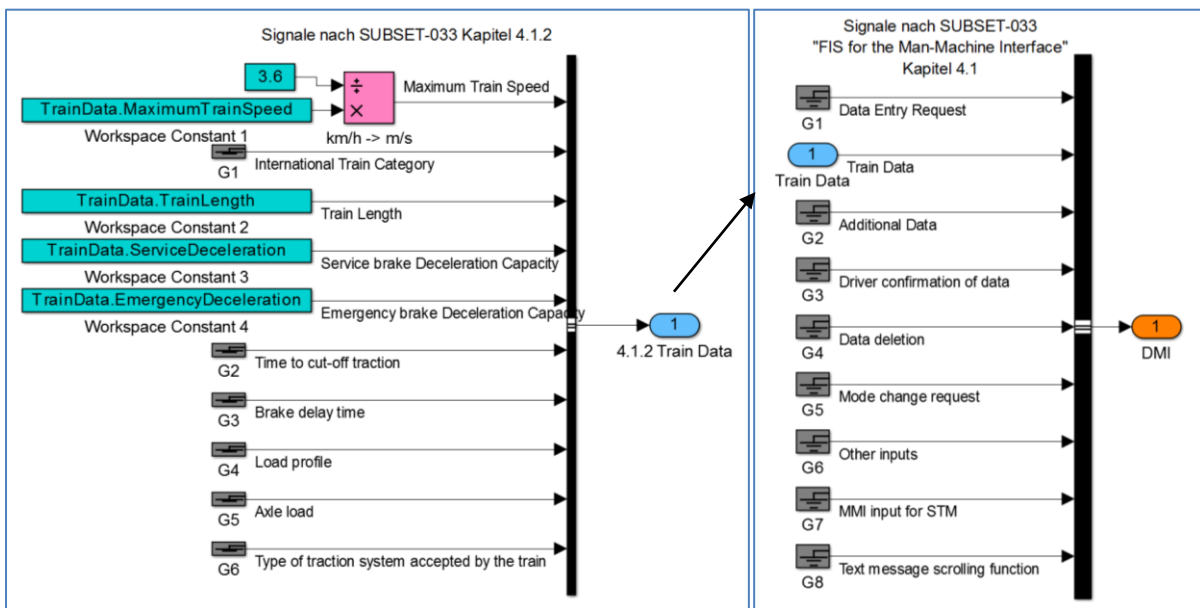


Abb. 37: Datenstruktur der vom ETCS-DMI an das ETCS-Fahrzeugsteuergerät gesendeten Signale, Subsysteme „Train Data from Workspace“ und „Man-Machine Interface (Output)“

Um die Daten des ETCS-DMI an das ETCS-Fahrzeugsteuergerät zu übertragen, werden in Abb. 37 die grundlegenden Datenstrukturen nach ETCS-Spezifikation Baseline 2 SUBSET-033 Abschnitt 4.1 vollständig angelegt, aber nur die notwendigen Variablen mit Werten gefüllt. Die links dargestellten Variablen sind Eingabeparameter des Triebfahrzeugführers oder fest eingestellte Zugparameter. Der Gleisatlas-Server erstellt für das Simulink-Zentralmodell eine MATLAB-Workspace-Datenstruktur „TrainData“, die vor Simulationsbeginn als Datei eingelesen wird. Da sich das ETCS-System zum Simulationsstart in einem vollständig initialisierten Zustand befindet, sind diese Parameter mit dem ersten Simulationsschritt festgelegt. Die Schnittstellendefinition bezieht sich auf ETCS Baseline 2, da in ETCS Baseline 3 das SUBSET-033 nicht vorhanden ist.

5.4.4 ETCS-Fahrzeugschnittstelle (Train Interface Unit, TIU)

Die Schnittstelle der ETCS-Fahrzeugausrüstung zum Schienenfahrzeug ist in SUBSET-034 definiert. Über diese Schnittstelle werden Statusinformationen des Fahrzeuges an die ETCS-Fahrzeugausrüstung übertragen. Die ETCS-Fahrzeugausrüstung sendet Freigaben und Befehle an das Schienenfahrzeug.

Das ETCS-Fahrzeugsteuergerät empfängt von der ETCS-Streckenzentrale die Fahrtfreigaben (Movement Authority) und ein erlaubtes Geschwindigkeitsprofil (SSP). Mit den vom Triebfahrzeugführer eingegebenen Zugparametern und den Informationen zur letzten überfahrenen ETCS-Balisengruppe kann das ETCS-Fahrzeugsteuergerät die Bremskurven (Abb. 38) berechnen. Wird eine Bremskurve überschritten, dann löst das ETCS-Fahrzeugsteuergerät eine Betriebs- und Notbremsungen aus und überträgt die Stellsignale über die ETCS-Fahrzeugschnittstelle (Abb. 39) an das Fahrzeug.

Die grundlegende Datenstruktur der Schnittstelle zwischen ETCS-Fahrzeugsteuergerät (ETCS-OBU) und Fahrzeug wird nach ETCS SUBSET-034 durch einen Simulink-Bus angelegt. Für die vom Fahrzeug an das ETCS-Fahrzeugsteuergerät gesendeten Daten wird in der vorliegenden Implementierung kein Signal benötigt. An die in Abb. 39 links dargestellten Eingangsschnittstelle sind keine Nutzer der Signale angeschlossen. Das ETCS-Fahrzeugsteuergerät kann jedoch über die Ausgabeschnittstelle (Abb. 39 rechts) eine Betriebsbremsung und Notbremsung über die Fahrzeugschnittstelle auslösen.

Im Submodell „Bremskurven berechnen“ (Abb. 38) findet der Übergang von dem ereignisgesteuerten Teil der ETCS-Kommunikation zu der ETCS-Streckenzentrale und dem deterministischen Teil des Simulink-Zentralmodells statt. Das distanzbasierte Geschwindigkeitsprofil wird zu jedem Ausführungstakt des ETCS-Fahrzeugsteuergerätes mit der aktuellen Position des Schienenfahrzeuges verglichen. Das Geschwindigkeitsprofil aus verschiedenen Geschwindigkeiten und Zieldistanzen wird mit jeder empfangenen ETCS-Botschaft („Movement Authority“ mit „Static Speed Profile“) ereignisgesteuert erzeugt.

Zu Beginn der Simulation wird in der ersten Simulationssekunde eine Geschwindigkeitsfreigabe zurückgehalten, um den nicht deterministischen Empfang der ersten „Movement Authority“-Botschaft und den deterministischen Bewegungsablauf zu entkoppeln.

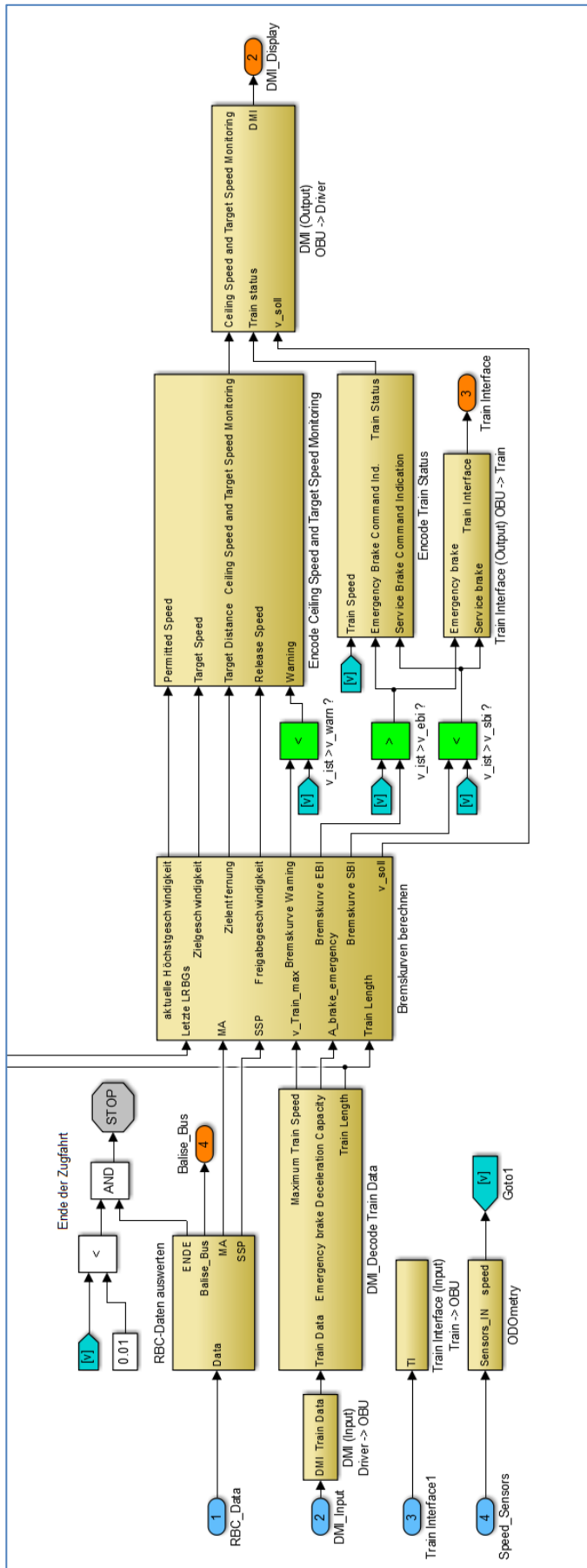


Abb. 38: Signalfluss innerhalb des ETCS-Fahrzeugsteuergerätes, mit Bremskurvenberechnung und Ein-/Ausgabe an das ETCS-DMI

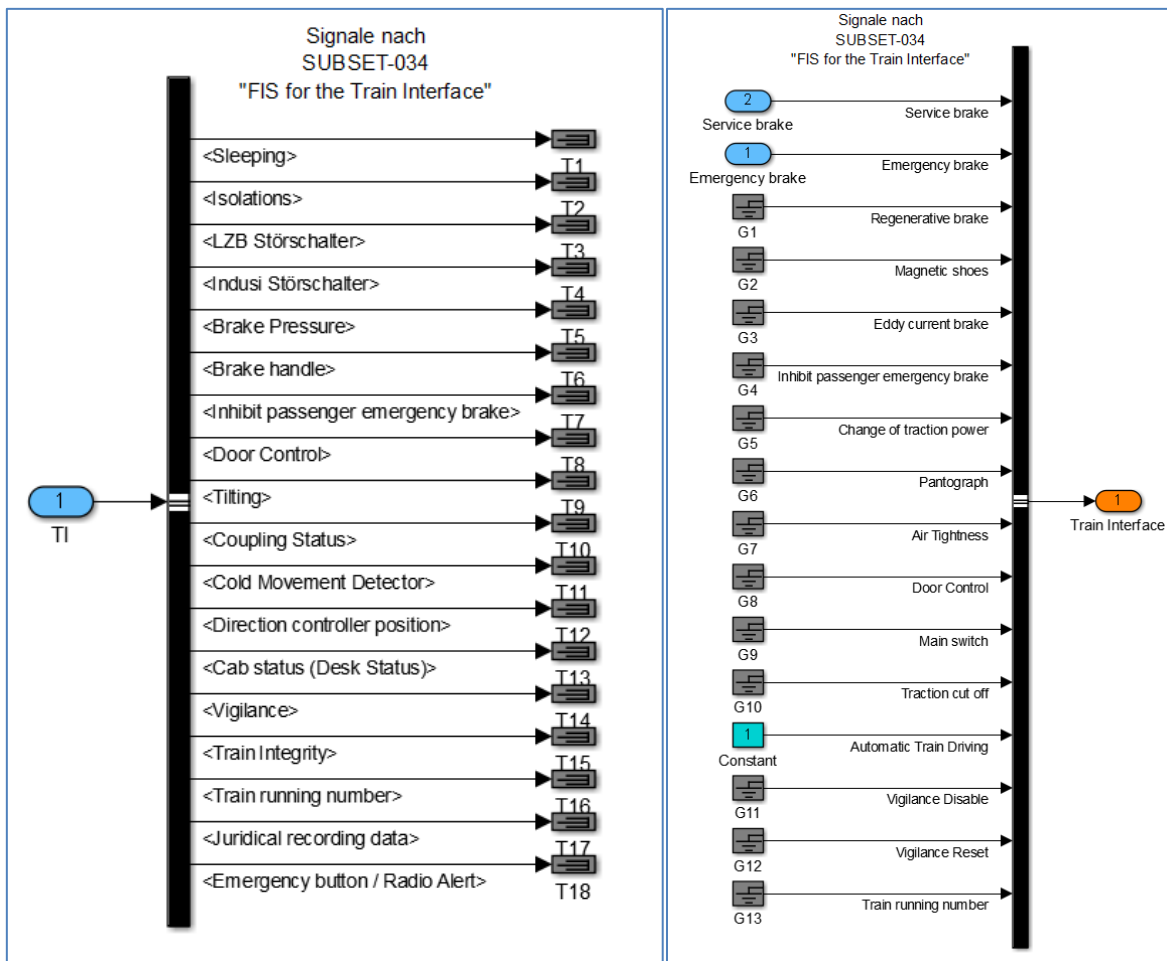


Abb. 39: ETCS-Fahrzeugschnittstelle, links Simulink-Bus vom Fahrzeug an das ETCS-OBU ankommend, rechts Simulink-Bus von ETCS-OBU an das Fahrzeug

5.4.5 Schnittstelle zum ETCS-Eurobalisenempfänger (Balise Interface Unit, BIU)

In Abschnitt 2.2.5 wurden ETCS-Eurobalisen als elektronische Wegmarken des ETCS-Systems vorgestellt. Bei einer Überfahrt einer ETCS-Balisenantenne über eine ETCS-Eurobalise werden die Daten der Eurobalise von einem Balisenempfänger auf dem Schienenfahrzeug eingelesen. Das separate Sensormodell des Balisenempfängers (Abschnitt 5.11.1) liest die Rohdaten der ETCS-Eurobalise ein und überträgt die Rohdaten an das ETCS-Fahrzeugsteuergerät (Abb. 30, „OBU_Balise_Data“).

Dieses Modell bildet innerhalb des ETCS-Fahrzeugsteuergerätes die Schnittstelle zum Sensormodell des Balisenempfängers. Die eingelesenen Rohdaten der ETCS-Eurobalise werden in die vom SUBSET-026 spezifizierten Signale transformiert und als Simulink-Signale weitergeleitet.

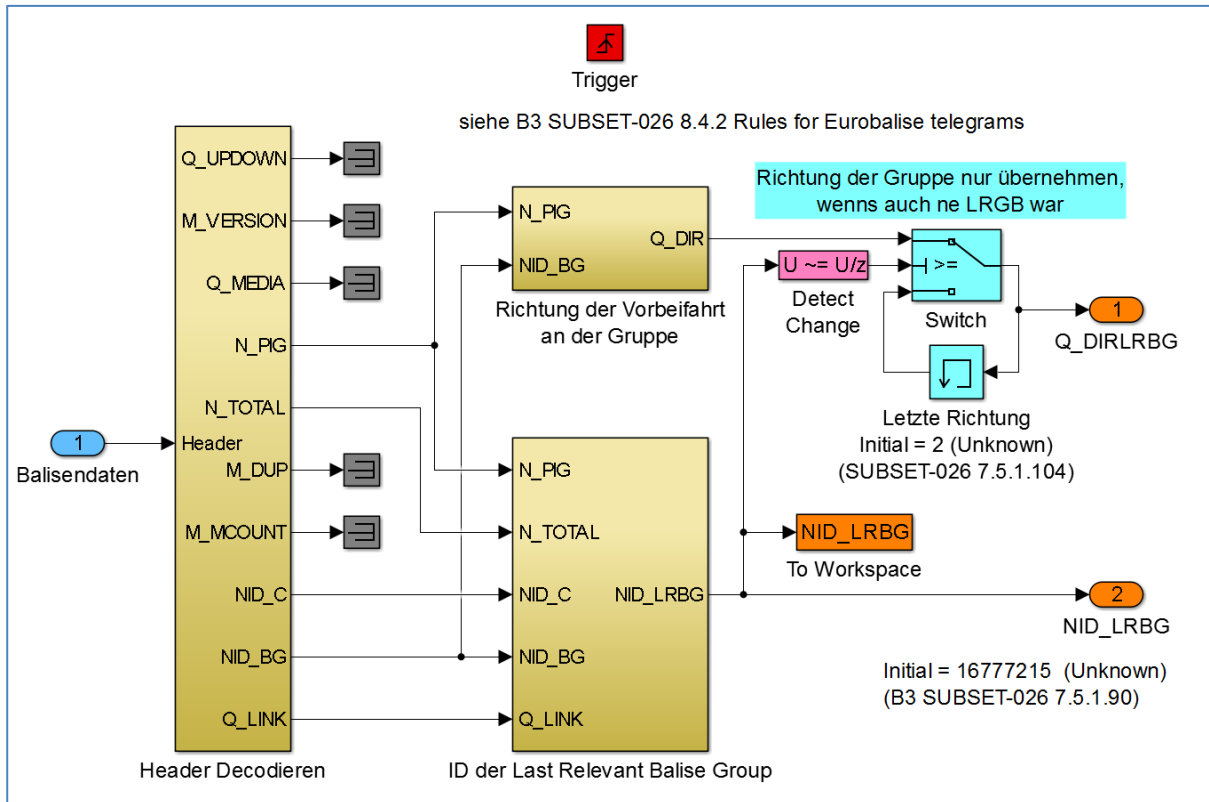


Abb. 40: Auswertung der Datenstruktur einer ausgelesenen ETCS-Eurobalise

In der aktuellen Implementierung werden aus dem Nachrichtenkopf (Header) der ETCS-Eurobalise die Nummer der ETCS-Balisengruppe (NID_LRBG) und die Richtung der Überfahrt über die ETCS-Balisengruppe (Q_DIRLRBG) ausgewertet (Abb. 40).

5.4.6 Odometrie-Modul

Die Schnittstelle zwischen ETCS-Fahrzeugsteuergerät und dem auf dem Schienenfahrzeug vorhandenen Odometriesystem ist in der ETCS-Spezifikation nicht enthalten. Daher wird ein Odometrie-Modul definiert, dass mit den im Sensor-Fehler-Modul erstellten Sensorsignalen ein sicheres und verfügbares Distanz- und Geschwindigkeitssignal mit Integritätsinformationen erzeugt.

Die ETCS-Fahrzeugausrüstung ist in der vorliegenden Implementierung der einzige Nutzer des Odometriesignals, sodass dieses Odometrie-Modul im Simulink-Subsystem des ETCS-Fahrzeugsteuergerätes „ETCS-OBU“ integriert wurde (siehe Abb. 38). Bei einer allgemeineren Verwendung des Odometrie-Moduls wäre ein eigenständiges Subsystem auf der obersten Verzeichnisebene des Simulink-Zentralmodells vertretbar. Die implementierte Schnittstelle erzeugt aus den idealen Sensorsignalen des Radimpulsgeber-Sensormodells das funktional notwendige Geschwindigkeitssignal.

5.5 Triebfahrzeugführer-Modell

In der Simulationsumgebung ergibt sich die Notwendigkeit anhand der Führerstands-signalisierung des ETCS-Systems (ETCS-DMI) die Bewegung des Schienenfahrzeuges durch Bedienhandlungen zu beeinflussen. Auf einem realen Schienenfahrzeug würde dies durch den Triebfahrzeugführer (Tf) ausgeführt. Der Triebfahrzeugführer steuert das Schienenfahrzeug und muss grundsätzlich die ihm angezeigten Signale mit dem Fahrplan des Zuges in Stellbefehle an das Fahrzeug umwandeln. In der Simulationsumgebung wird hierfür ein Triebfahrzeugführer-Modell oder Autopilot (im Folgenden als Fahrermodell bezeichnet, Abb. 41) eingesetzt. Das Fahrermodell stellt den „intelligenten“ Regler dar, der aus den Informationen der ETCS-Führerstands-signalisierung eine Sollwertvorgabe für das Schienenfahrzeug generiert. Dieser Vorgang kann sehr komplex sein, soll hier aber auf seine minimale Funktionalität beschränkt werden.

Automatische Systeme zur Geschwindigkeitsregelung wie die „Automatische Fahr- und Bremssteuerung“ (AFB) oder andere „Automatic Train Operation“ (ATO) Systeme können zusätzlich oder alternativ zu dem hier beschriebenen Modell integriert werden, sind hier jedoch nicht modelliert.

In der Simulationsumgebung wird davon ausgegangen, dass alle infrastrukturseitigen Signale und Befehle dem Triebfahrzeugführer über das ETCS-DMI zur Verfügung gestellt werden. Auf dem ETCS-DMI werden auch alle notwendigen fahrzeugseitigen Informationen für die Entscheidung des virtuellen Triebfahrzeugführers angezeigt. Den Fahrerwunsch bzw. Fahrbefehl leitet das Modell als eine Sollbeschleunigung an das Zentralsteuergerät (ZSG) weiter. Das Schienenfahrzeugmodell enthält einen aktivierten Führerstand für die in Fahrtrichtung zeigende Fahrzeugspitze. Auf die Implementierung eines identischen deaktivierten Führerstandes wurde verzichtet.

Die visuellen Informationen, die der Triebfahrzeugführer von dem ETCS-DMI ablesen könnte, werden in der Simulationsumgebung durch einen Simulink-Bus ausgedrückt. An der Schnittstelle zwischen ETCS-Fahrzeugsteuergerät und Fahrermodell werden in der aktuellen Implementierung folgende Signale übergeben:

- „Permitted Speed“ – aktuell erlaubte Höchstgeschwindigkeit
- „Target Distance“ – Abstand zur nächsten Änderung der Höchstgeschwindigkeit
- „Target Speed“ – Betrag der nächsten Höchstgeschwindigkeit
- Zulässige Höchstgeschwindigkeit aus der Bremskurvenberechnung
- Aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit

In der Implementierung des Fahrermodells (Abb. 41) wird im Block „Tf_Bremskurve“ die Sollgeschwindigkeit v_{soll} als Minimum aus der aktuell erlaubten Höchst-

geschwindigkeit v_{max} („Permitted Speed“) und der Bremskurve (vor der nächsten Geschwindigkeitsänderung v_{ziel} , „Target Speed“) bestimmt. Solange die Höchstgeschwindigkeit nicht durch eine Bremskurve überlagert bzw. reduziert wird, soll das Fahrzeug auf die Höchstgeschwindigkeit beschleunigen und diese halten.

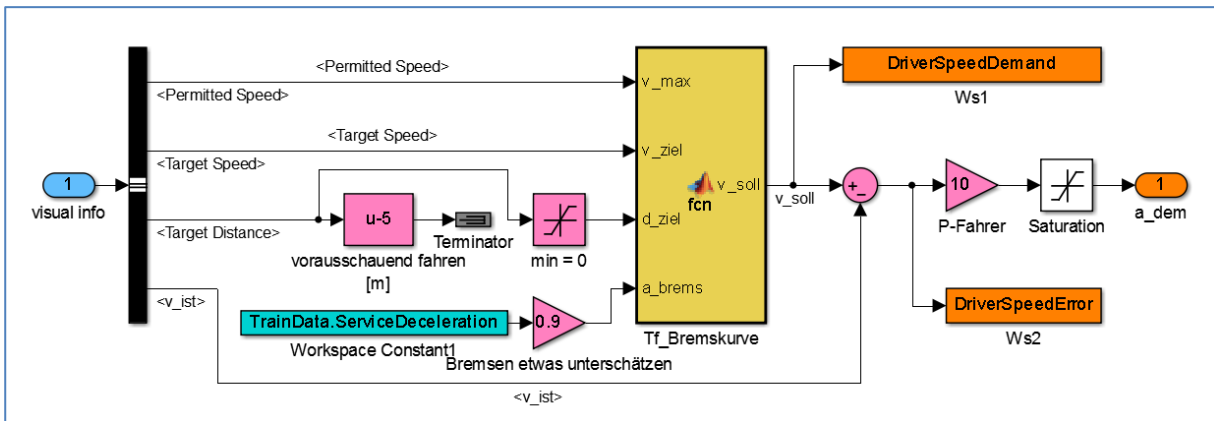


Abb. 41: Implementierung des Fahrermodells (Subsystem „Driver“ in Abb. 30)

Die aus der Bremskurve bestimmte Sollgeschwindigkeit v_{soll} wird in dem Proportionalregler mit der Ist-Geschwindigkeit v_{ist} verglichen, der daraus eine Sollbeschleunigung a_{dem} berechnet. In der vorhandenen Implementierung wurde ein Proportionalregler mit Stellgrößenbegrenzung verwendet. Aus der integrierend wirkenden Regelstrecke ergibt sich keine bleibende Regelabweichung (Geschwindigkeitsabweichung). Die positive Stellgrößenbeschränkung im Block „Saturation“ ergibt sich aus dem maximalen Beschleunigungsvermögen des Fahrzeuges. Die negative Stellgrößenbeschränkung ergibt sich aus der maximalen Verzögerung der Betriebsbremse. Das Signal der Sollbeschleunigung a_{dem} beschreibt in diesem Modell eine Beschleunigungsanforderung oder ein Beschleunigungswunsch des virtuellen Triebfahrzeugführers. In den nachgelagerten Fahrzeugtechnikmodellen wird die Beschleunigungsanforderung weiterverarbeitet und (wenn möglich) in eine physikalische Beschleunigung umgesetzt.

In dem Modell sind keine Reaktionszeiten des Triebfahrzeugführers modelliert, die zu einer Zeitverzögerung zwischen Eingang und Ausgang führen würden.

Für die Berechnung der Bremskurven sind die Maximalgeschwindigkeit v_{max} , die Zielgeschwindigkeit v_{ziel} , die Bremsbeschleunigung a_{brems} und die Entfernung zum Ende der Bremskurve d_{ziel} gegeben. Die nächste Geschwindigkeitsänderung wird dem Fahrermodell durch den Wert der neuen Höchstgeschwindigkeit v_{ziel} und den Abstand bis zu ihrer Gültigkeit vor dem Fahrzeug d_{ziel} mitgeteilt. Das Fahrermodell erstellt aus dem Geschwindigkeitsunterschied zwischen der aktuellen und der zukünftigen Höchstgeschwindigkeit eine Bremskurve in Abhängigkeit von dem Bremsvermögen

des Schienenfahrzeuges. Die in diesem Modell vorgestellten Bremskurven sind unabhängig von den Bremskurven der Zugsicherung (hier des ETCS-Systems).

In den zwei nachfolgenden Abschnitten werden zwei unterschiedliche Bremskurvencharakteristiken vorgestellt, die das Fahrverhalten des virtuellen Triebfahrzeugführers nachgebilden.

5.5.1 Bremskurve mit distanzabhängiger Geschwindigkeitsreduzierung

Bei dieser Bremskurve wird aus dem Geschwindigkeitsunterschied und der vorgegebenen Bremsbeschleunigung eine konstante Geschwindigkeitsreduzierung über dem Bremsweg bestimmt. Die Geschwindigkeitsreduzierung pro Zeiteinheit und die (auf die Zeit bezogene) Beschleunigung haben einen charakteristischen nichtlinearen Verlauf.

Der Geschwindigkeitsunterschied Δv zwischen aktueller Maximalgeschwindigkeit v_{max} und zukünftiger Maximalgeschwindigkeit v_{ziel} beträgt:

$$\Delta v = v_{max} - v_{ziel} \quad (3)$$

Daraus ergibt sich die Gesamtzeit t_{brems} für die Bremsung:

$$\Delta v = -t_{brems} \cdot a_{brems} \rightarrow t_{brems} = -\frac{\Delta v}{a_{brems}} \quad (4)$$

Der Gesamtbremsweg s_{ges} wird bestimmt durch:

$$s_{ges} = v_{ziel} \cdot t_{brems} - \frac{\Delta v^2}{2a_{brems}} \quad (5)$$

Die Sollgeschwindigkeit $v_{sollBC}(d_{ziel})$ wird abhängig von der Distanz bis zum Zielpunkt d_{ziel} aus der Maximalgeschwindigkeit v_{max} und dem Term der distanzabhängigen Geschwindigkeitsreduzierung bestimmt:

$$v_{sollBC}(d_{ziel}) = v_{max} - \frac{s_{ges} - d_{ziel}}{s_{ges}} \cdot \Delta v \quad (6)$$

Abb. 42 zeigt an einem Beispiel die charakteristischen Geschwindigkeitsverläufe über der Zeit und der Distanz.

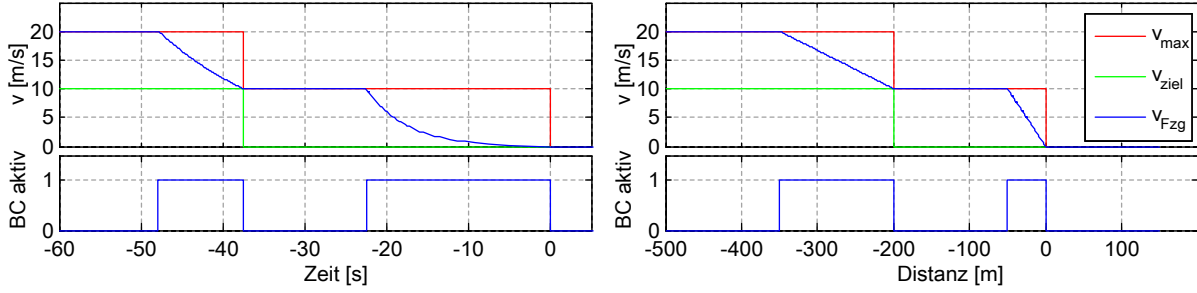


Abb. 42: Bremskurve (BC) mit distanzabhängiger Geschwindigkeitsreduzierung

Für dieses Szenario werden folgende Parameter verwendet: Bremsbeschleunigung $a_{brems} = -1 \text{ m/s}^2$, Höchstgeschwindigkeit $v_{max} = 20 \text{ m/s}$, Zielgeschwindigkeit $v_{ziel} = \{10; 0\} \text{ m/s}$ und die schrittweisen Vorgabe der Distanz bis zum Zielpunkt $d_{ziel} = \{1000..0\} \text{ m}$.

Die Bremskurve erzeugt eine konstante Geschwindigkeitsreduzierung über der gefahrenen Distanz. Der Beschleunigungsverlauf weist einen charakteristischen nichtlinearen Verlauf auf. Der Nachteil dieses Modells besteht in der asymptotischen Annäherung der Geschwindigkeit (im Zeitverlauf) zum Stillstand, da hier die Geschwindigkeit vor dem Zielpunkt klein wird.

5.5.2 Bremskurve mit konstanter Beschleunigung

Die zweite Bremskurve beschreibt eine Geschwindigkeitsreduzierung des Fahrzeuges mit einer konstanten Beschleunigung über dem gesamten Bremsvorgang. Hierzu wird die Zeit für die Geschwindigkeitsreduzierung t_{brems} in Abhängigkeit von der vorgegebenen Beschleunigung a_{brems} und der Geschwindigkeitsdifferenz bestimmt:

$$t_{brems} = \frac{v_{ziel} - v_{max}}{a_{brems}} \quad (7)$$

Aus der Verzögerungszeit t_{brems} ist der Bremsweg s_{brems} für eine (negativ) beschleunigte translatorische Bewegung mit einer Anfangsgeschwindigkeit zu berechnen:

$$s_{brems} = \frac{1}{2} \cdot a_{brems} \cdot t_{brems}^2 + v_{max} \cdot t_{brems} \quad (8)$$

Daraus lässt sich auch die Distanz d_{ziel} bis zum Zielpunkt ableiten, wenn man die Verzögerungszeit t_{brems} für den gesamten Bremsvorgang durch die verbleibende Bremszeit t_{dec} ersetzt:

$$d_{ziel} = \frac{1}{2} \cdot a_{brems} \cdot t_{dec}^2 + v_{max} \cdot t_{dec} \quad (9)$$

Aus der Entfernung bis zur Geschwindigkeitsänderung d_{ziel} wird die nach dieser Charakteristik vergangene Zeit t_{dec} bestimmt. Hierzu wird die Formel (9) nach t_{dec} aufgelöst:

$$t_{dec} = -\frac{v_{max}}{a_{brems}} + \sqrt{\left(\frac{v_{max}}{a_{brems}}\right)^2 + \frac{2 \cdot (s_{brems} - d_{ziel})}{a_{brems}}} \quad (10)$$

Befindet sich das Fahrzeug innerhalb des Bremsweges, so wird aus der aktuellen Höchstgeschwindigkeit die Sollgeschwindigkeit der Bremskurve v_{soll} bestimmt:

$$v_{soll} = v_{max} - a_{brems} \cdot t_{dec} \quad (11)$$

Dies führt zu einer Bremskurve, bei der die Beschleunigung des Fahrzeuges konstant ist. Daraus ergibt sich eine konstante Geschwindigkeitsreduzierung über der Zeit und ein nichtlinearer Geschwindigkeitsverlauf über die gefahrene Distanz. Da die Bremskurven der Zugsicherung (ETCS) in Abhängigkeit von der Zieldistanz definiert sind, könnte diese Bremscharakteristik während des Bremsvorganges die Bremskurven der Zugsicherung verletzen (siehe Abschnitt 7.1.1).

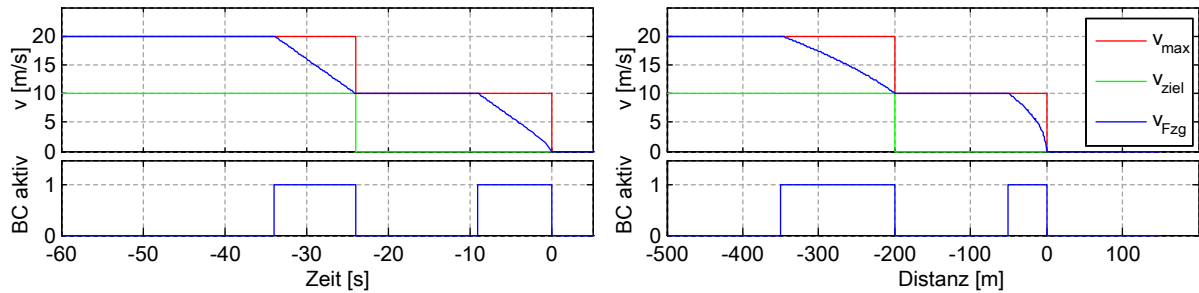


Abb. 43: Bremskurve mit konstanter Beschleunigung

Abb. 43 zeigt die Charakteristik dieser Bremskurve mit folgenden Parametern: Bremsbeschleunigung $a_{brems} = -1 \text{ m/s}^2$, Höchstgeschwindigkeit $v_{max} = 20 \text{ m/s}$, Zielgeschwindigkeit $v_{ziel} = \{10; 0\} \text{ m/s}$ und der schrittweisen Vorgabe der Distanz bis zum Zielpunkt $d_{ziel} = \{1000..0\} \text{ m}$.

5.6 Zentralsteuergerät (ZSG)

Das Zentralsteuergerät fasst die Grundfunktionen des Schienenfahrzeuges in einem Steuergerät zusammen, soweit die Funktionen nicht von spezialisierten Steuergeräten bearbeitet werden. Reale Zentralsteuergeräte werden auf bahnzugelassenen Steuergeräteplattformen mit vielen Ein- und Ausgangskanälen und einer oder mehrerer Prozessoreinheiten ausgeführt.

In der Simulationsumgebung gibt es zwei sehr unterschiedliche Implementierungen. Die Minimalimplementierung wird im folgenden Abschnitt vorgestellt. Weiterhin gibt

es eine vollständige Implementierung des IFS-Erprobungsträger-Zentralsteuergerätes (Sibas32-Plattform) als Simulink-Modell, auf das hier nicht weiter eingegangen werden kann.

5.6.1 Minimalimplementierung

In der Minimalimplementierung wird auf eine tiefere Strukturierung des Steuergerätes verzichtet und nur die für die Bewegungssteuerung des Fahrzeuges erforderliche Logik implementiert. Dabei wird hauptsächlich die Beschleunigungsanforderung des Triebfahrzeugführers (Fahrermodell in Abschnitt 5.5) verarbeitet und an das Fahrzeugtechnikmodell (Abschnitt 5.7) weitergegeben. Die Beschleunigungsanforderung des Triebfahrzeugführers wird durch eine Notbremsung des ETCS-Fahrzeugsteuergerätes (Abschnitt 5.4.1) übersteuert. Eine einmal ausgelöste Notbremsung wird gehalten, bis das Fahrzeug zum Stillstand gekommen ist. Das in dieser Logikschaltung verwendete SRFlipFlop aktiviert (Set) seinen Ausgang durch das ausgelöste Notbremssignal. Der Ausgang des SRFlipFlop wird (unabhängig vom Notbremssignal) erst dann deaktiviert (Reset), wenn die Stillstandsbedingung erfüllt ist.

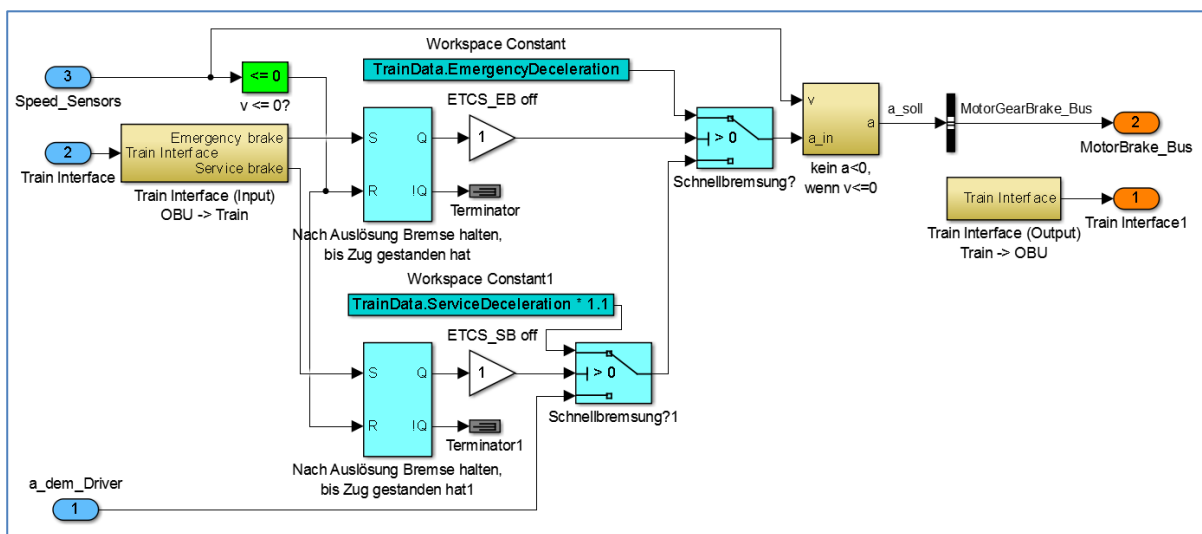


Abb. 44: Minimalimplementierung der Zentralsteuergerät-Funktionalität (Subsystem „Central Control Unit“ in Abb. 30)

Die ETCS-Fahrzeugschnittstelle (Abschnitt 5.4.4) konzentriert sich in diesem Modell auf das Zentralsteuergerät. Die vom ETCS-Fahrzeugsteuergerät an das Fahrzeug ausgegebenen Signale werden im Block „Train Interface“ eingelesen (Abb. 44, links). Die Signale zur Zwangsbremung durch die Betriebsbremse und zur Notbremsung werden weiterverarbeitet. Das Zentralsteuergerät sendet in der aktuellen Implementierung Konstanten als statische Zustandsdaten nach SUBSET-034 an das ETCS-Fahrzeugsteuergerät zurück.

5.7 Fahrzeugtechnik – Struktur der Bewegungsmodelle

Das Modell zur Beschreibung der Bewegung des Schienenfahrzeuges ist in ein eindimensionales und ein dreidimensionales Modell geteilt. Dies führt zu großen Vereinfachungen und neuen Möglichkeiten in der Modellierung. Durch Co-Simulationsschnittstellen werden die Simulationen miteinander verbunden.

Die eindimensionale Bewegung des Schienenfahrzeuges auf dem Gleis wird durch die sehr nichtlinearen Motor-Bremse-Interaktionen beeinflusst. Dies lässt sich in einer signal- oder energieflussbasierten Simulation vorteilhaft nachbilden. Die dreidimensionale Bewegung des Schienenfahrzeuges und dessen Anbauteile führen zu sehr komplexen geometrischen und physikalischen Bewegungsgleichungen. Durch den Einsatz von Mehrkörpersimulation wird der Benutzer von der mathematischen Beschreibung des Systems entlastet. In einer grafischen Programmoberfläche werden die geometrischen Verhältnisse und physikalischen Zusammenhänge der Fahrzeugstruktur benutzerfreundlich modelliert. Das Mehrkörpersimulationsprogramm simuliert das Systemverhalten numerisch. Die Bewegungsmodelle beschreiben physikalische Vorgänge und werden durch einen Solver mit einer kontinuierlichen Zeitbasis ausgeführt. Alternativ können die Bewegungsmodelle durch einen Solver mit fester Taktrate ausgeführt werden.

Das allgemeine Bewegungsmodell eines Fahrzeuges berechnet aus einer Antriebs- bzw. Bremskraft, auf einen Körper die Größen Beschleunigung, Geschwindigkeit und Distanz (Positionen). Die Berechnungen sind im eindimensionalen oder dreidimensionalen Raum möglich. Aus der Teilung der Bewegungsmodelle ergeben sich mehrere Varianten, diese Modelle aufzubauen. Allgemein lässt sich ein zusammengefasstes Bewegungsmodell folgendermaßen darstellen:



Abb. 45: Allgemeines Bewegungsmodell

Teilt man nun das Bewegungsmodell in ein eindimensionales und ein dreidimensionales Teilmodell auf, dann ist der Übergang von einer Kraft bzw. Beschleunigung zu Bewegungsgrößen in jedem der beiden Teilmodelle möglich. Die in Abb. 46 dargestellten Strukturen wurden untersucht und werden im folgenden Absatz näher beschrieben.

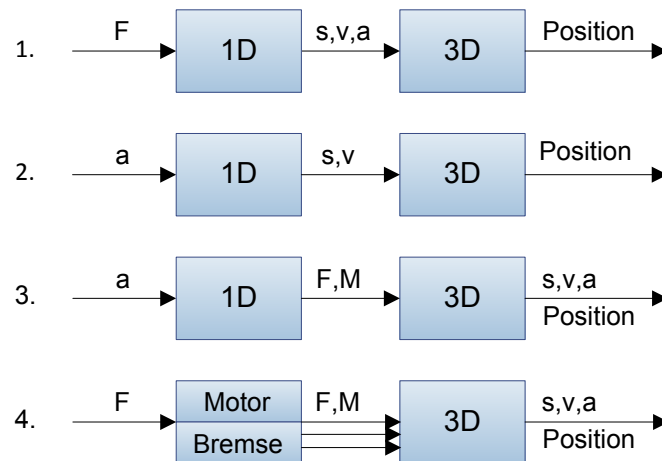


Abb. 46: Strukturen von ein- und dreidimensionalen Bewegungsmodellen

1. Im eindimensionalen Modell wird ein lineares Bewegungsmodell benutzt, um die Bewegungsgrößen (a , v , s) zu berechnen. Eine der drei Größen (bevorzugt die Distanz s zur Vermeidung von numerischen Integrationsabweichungen; oder alle Größen, wenn das für den Solver z.B. in SIMPACK günstig ist) wird an das dreidimensionale Bewegungsmodell übergeben. Die Position des Fahrzeuges wird dann an den Ort positioniert, an dem der vorgegebene dreidimensionale Trassenverlauf die Distanz vom Startpunkt hat. Wird nicht die Distanz, sondern die Geschwindigkeit oder Beschleunigung an das dreidimensionale Modell übergeben, findet die Integration zur Distanz in der Mehrkörpersimulation statt.

2. Aus der Beschleunigungsanforderung des Zentralsteuergerätes bzw. des Fahrermodells werden in einer Differenzialgleichung die Geschwindigkeit und Distanz berechnet. Das Fahrzeug in der Mehrkörpersimulation wird mit einer Distanzvorgabe an die aktuelle Position auf der Strecke gesetzt.

3. Aus der Beschleunigungsanforderung des Zentralsteuergerätes bzw. des Fahrermodells wird in einem zusammengefassten Motor-Bremse-Modell die auf das Fahrzeug erzeugte Kraft berechnet. Diese Kraft wird an die 3D-Bewegungssimulation übergeben und als Beschleunigungs- bzw. Bremskraft auf einen massebehafteten Körper des Fahrzeuges geleitet. Die Berechnung der ein- und dreidimensionalen kinematischen Größen findet in der 3D-Mehrkörpersimulation statt.

4. Für eine realistische Beschreibung des Traktions- und Bremsverhaltens müssen die Systeme Motor und Bremse getrennt modelliert werden. Die aus den 1D-Modellen entstandenen Kräfte und Momente der Systeme können nun an den verteilten Kraftangriffspunkten des Mehrkörpermodells wirken. Auch hier wird aus der Reaktion des massebehafteten Mehrkörpermodells auf die einwirkenden Kräfte und Momente die Bewegung des Fahrzeuges berechnet.

Das eindimensionale Modell wird im Simulink-Zentralmodell (Abb. 22) im Subsystem „vehicle technology“ ausgeführt. Die in Abschnitt 5.7.2 beschriebene Co-Schnittstelle zum dreidimensionalen Mehrkörpermodell ist im Subsystem „MBS Vehicle“ (Abb. 30) enthalten.

5.7.1 Implementierung des linearen 1D-Bewegungsmodells mit Beschleunigungsvorgabe

In einem linearisierten Bewegungsmodell werden alle Antriebs- und Bremssysteme zu einem System zusammengefasst. Man geht davon aus, dass es einen linearen Zusammenhang zwischen der auf einen Körper aufgebrachten Kraft und dessen daraus folgender Bewegung gibt.

Dieses Modell kann weiter vereinfacht werden, indem man die Masse des Fahrzeuges als bekannt und konstant annimmt. So kann die für die Bewegung ursächliche Kraft direkt als Beschleunigung (Vorgabe aus dem Fahrermodell) ausgedrückt werden.

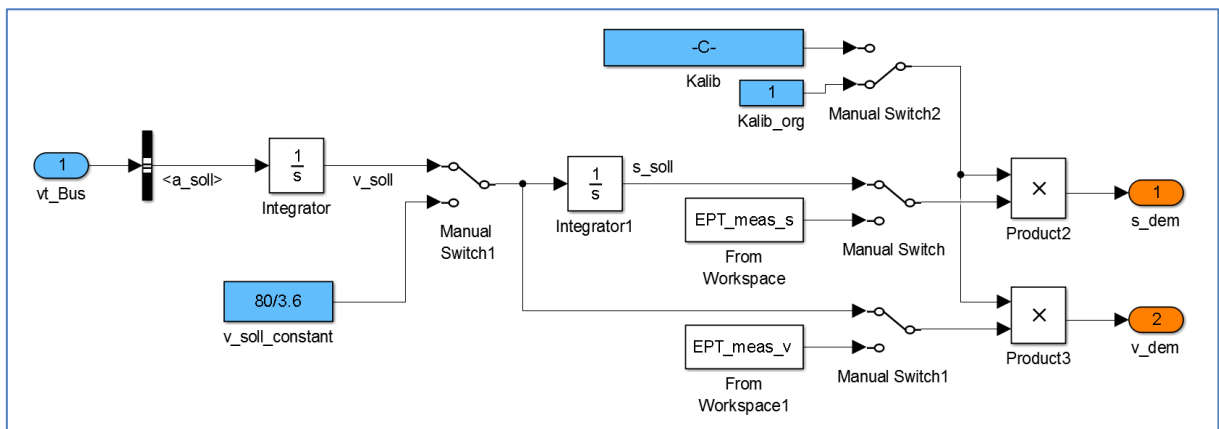


Abb. 47: Lineares Bewegungsmodell, kontinuierliche Zeitbasis

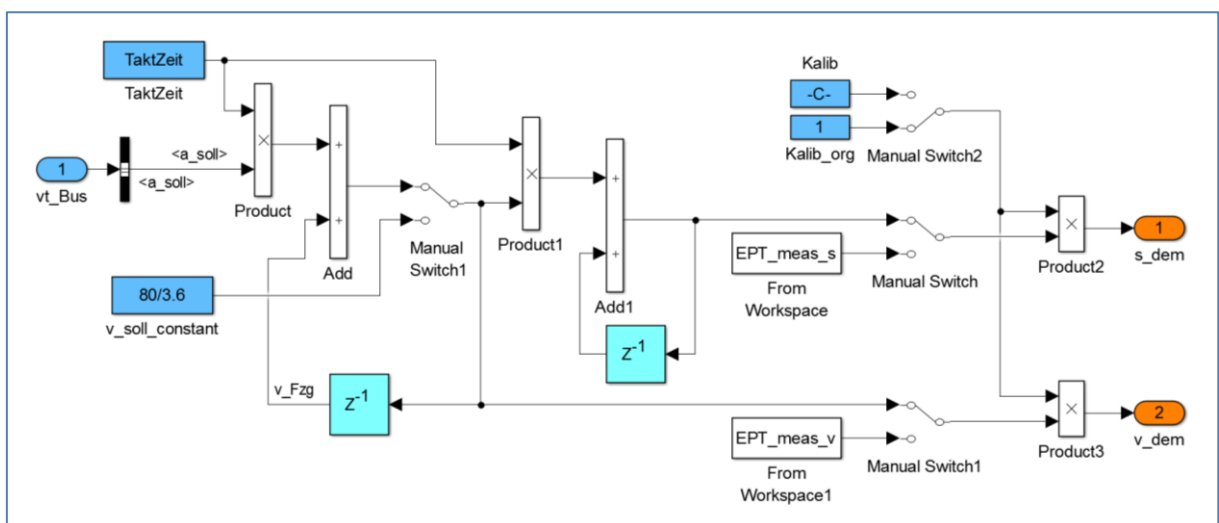


Abb. 48: Lineares Bewegungsmodell, diskrete Zeitbasis

In Abb. 47 ist das lineare Bewegungsmodell mit kontinuierlicher Zeitbasis dargestellt. Eine Implementierung mit diskreter Zeitbasis (in z-Transformation, siehe Abb. 48) ist ebenfalls möglich.

In beiden Modellen kann man manuell auf eine konstante Geschwindigkeit umschalten. In den Variablen „EPT_meas_“ sind die Distanz- und Geschwindigkeitsmessdaten des IFS-Erprobungsträgers gespeichert. Dem simulierten Fahrzeugmodell lässt sich durch Vorgabe der Messdaten die Bewegung des Versuchsfahrzeuges aufprägen. Bei gleicher Fahrstrecke, gleichem Fahrprofil und zum gleichen Zeitpunkt kann die Messfahrt des Versuchsfahrzeuges nachvollzogen werden. Die Messabweichung der Distanzmessstechnik auf dem Versuchsfahrzeug (siehe Kapitel 6) führen zu einer charakteristischen Fehlpositionierung des simulierten Fahrzeuges entlang des Fahrweges. Durch eine nachträgliche Korrektur der Messdaten (Abb. 48) ist dieser Effekt minimiert.

5.7.2 Schnittstelle zum dreidimensionalen Bewegungsmodell

Während einer Teilsimulation werden das Simulink-Zentralmodell und das Mehrkörpersimulationsmodell in SIMPACK parallel ausgeführt. Eine SIMPACK-MATLAB-Co-Simulationsschnittstelle SIMAT koppelt die SIMPACK-Mehrkörpersimulation mit dem Simulink-Zentralmodell (Abb. 49). Die in Simulink mit einem kontinuierlichen oder diskreten Solver berechneten Signale weisen eine variable oder konstante zeitliche Schrittweite auf, die sich von der variablen Schrittweite in der Mehrkörpersimulation unterscheiden kann.



Abb. 49: Struktur der Positionsberechnung

Die aus den eindimensionalen Bewegungsmodellen im Simulink-Zentralmodell berechneten eindimensionalen kinetischen (F,M) oder kinematischen (s,v,a) Größen werden über die Co-Simulationsschnittstelle an das Mehrkörpersimulationsprogramm übergeben. Die Synchronisation zwischen der Simulink- und der Mehrkörpersimulation wird durch die Co-Simulationsschnittstelle durchgeführt.

Die „Messsignale“ der virtuellen Sensoren werden aus der Mehrkörpersimulation in das Simulink-Modell übertragen und für die weitere Verwendung vorverarbeitet. Die eindimensionalen Signale (Distanz s, Geschwindigkeit v, Beschleunigung a), die sich auf die Gleisachse beziehen, können ohne weitere Konvertierung als ideale physikalische Signale ausgegeben werden. Beschleunigungs- (mit und ohne

Erdbeschleunigung) und Winkelgeschwindigkeitsmessungen eines IMU-Sensors sind am Sensorkoordinatensystem ausgerichtet und werden nicht konvertiert.

Innerhalb der Mehrkörpersimulation wird ein lokales, erdfestes Koordinatensystem zur Beschreibung der Bewegung des Schienenfahrzeuges im Raum genutzt. Die gemessenen dreidimensionalen Positionen und Geschwindigkeiten der GNSS-Antennen werden mithilfe einer Koordinatentransformation in das ECEF-Koordinatensystem konvertiert (Anhang D.2 und A.10).

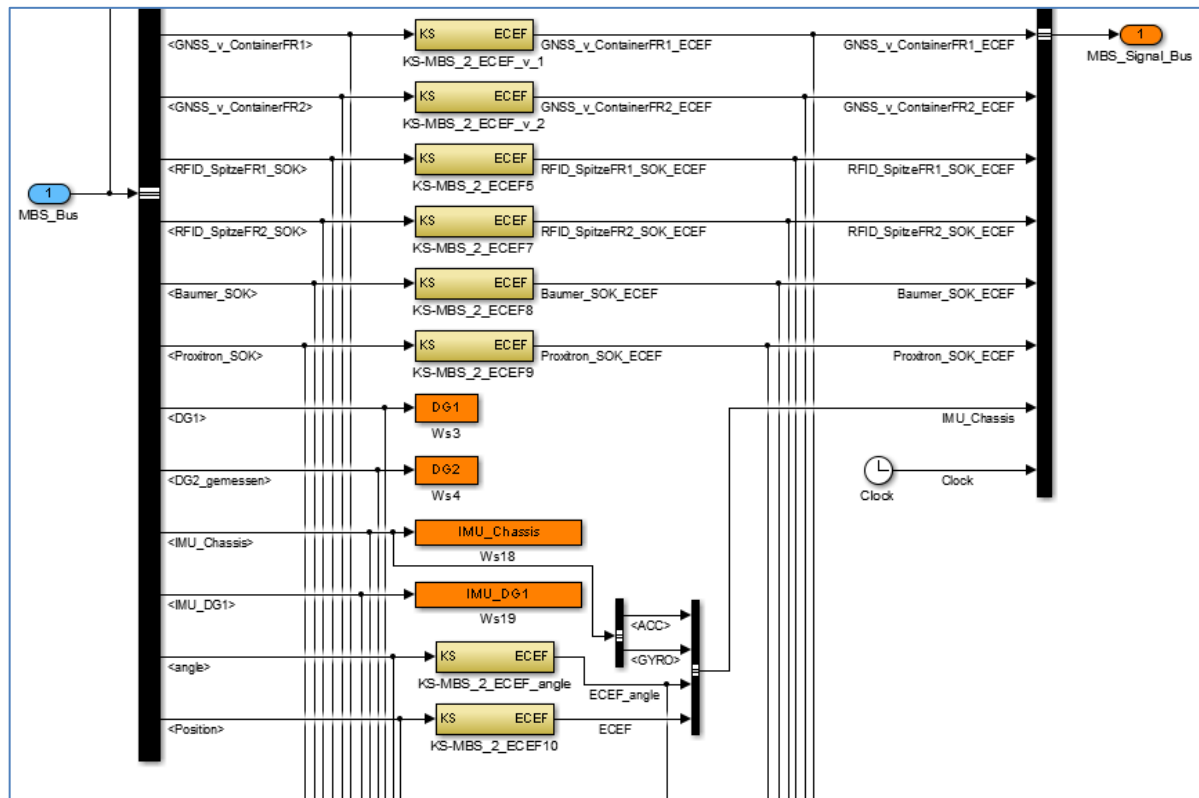


Abb. 50: Schnittstelle zwischen SIMPACK und Simulink mit Koordinatentransformation in ECEF

Die Signale aus der Mehrkörpersimulation werden an der SIMAT-Schnittstelle in einen strukturierten Simulink-Bus „MBS-Bus“ abgelegt. Abb. 50 zeigt einen Teil des Submodells zur Konvertierung der Signale aus der Mehrkörpersimulation in die festgelegten Simulink-Formate. In dem Subsystem „MBS2ECEF“ werden die Positionen im Koordinatensystem der Mehrkörpersimulation (KS-MKS) in das ECEF-Koordinatensystem konvertiert. Anschließend werden alle Signale in einem definierten Format in dem Simulink-Bus „MBS_Signal_Bus“ zusammengefasst und als Ergebnis der Mehrkörpersimulation allen Submodellen der Simulationsumgebung zur Verfügung gestellt.

5.8 Dreidimensionales Schienenfahrzeug- und Umgebungsmodell der Mehrkörpersimulation

In Mehrkörpersimulationsprogrammen können die komplexe Geometrie und die kinetischen Eigenschaften von Elementen und Körpern durch benutzerfreundliche Editoren konfiguriert werden. Hierzu werden einzelne Körper (bodies) modelliert und deren Bewegung anschließend über Verbindungen (joints), Zwangsbedingungen (constraints) und Kraftelemente (force elements) eingeschränkt oder verändert. Besondere Verbindungselemente erzeugen den Bezug zwischen einem Körper und dem Fahrweg.

Die sich aus den Eigenschaften des Modells ergebenden Bewegungsgleichungen erzeugt das Mehrkörpersimulationsprogramm automatisch. Dies ist vorteilhaft, wenn der Benutzer sich auf die Modellierung der technischen und physikalischen Zusammenhänge und nicht auf das (sehr abstrakte und fehleranfällige) Aufstellen der Bewegungsdifferenzialgleichungen konzentrieren möchte.

In der aktuellen Implementierung wird das Mehrkörpersimulationsprogramm SIMPACK verwendet und in den automatisierten Simulationsablauf der Simulationsumgebung eingebunden. Das Mehrkörper-Schienenfahrzeugmodell wird während der Entwicklung auf einen geraden Schienenstrang gesetzt. Vor dem Start einer Teilsimulation, innerhalb eines Simulationsdurchlaufes, wird vom Gleisatlas-Server die zu befahrende Strecke generiert und die Streckendatei des Mehrkörpersimulationsmodells ersetzt. Die Streckendefinition und die Modelldatei sind ASCII-basierte Dateiformate und können mit Stringoperationen erstellt und verändert werden.

Die Szenariosteuerung schreibt die Startparameter der Modellzustände vor der ersten Teilsimulation in die SIMPACK-Modelldatei. Beim Abbruch der vorangegangenen Teilsimulation werden die Zustände des Modells zwischengespeichert und als Startparameter für die Modelldatei der nachfolgenden Teilsimulation genutzt.

Die vollständigen Simulationsergebnisse jeder Teilsimulation werden in einem proprietären SIMPACK-Dateiformat und als MATLAB-Datendatei abgespeichert und können zur Detailanalyse vom Benutzer nach der Simulation ausgewertet werden.

5.8.1 Streckendefinition

In SIMPACK sind mehrere Arten der Streckendefinitionen vorgesehen. Über kartografische Streckendefinitionen wird analog zu Abschnitt 4.7 die Strecke durch eine Aneinanderreihung von geometrischen Grundelementen definiert. Eine weitere Möglichkeit der Streckendefinition ist die Beschreibung der Strecke durch einen Polygonzug. SIMPACK interpretiert die Aneinanderreihung von Punkten entlang der

Trasse als einen kontinuierlichen Streckenverlauf, der als kubische Spline umgesetzt wird. Für den Gleisatlas-Server wird dieses Streckendateiformat als flexibler angesehen. Die Trassierung, aus der der Polygonzug erzeugt wird, ist in den Abschnitten 4.4 und 4.7 beschrieben. Eine SIMPACK-Streckendefinition ist in Anhang B.4 dokumentiert.

Während der Initialisierung der Simulationsumgebung wird der Gleisatlas-Server mit einer im railML-Format vorliegenden Gleisnetzdefinition und einem Fahrplan konfiguriert. Vor jeder Teilsimulation erzeugt der Gleisatlas-Server für die nach Fahrplan zu befahrende Teilstrecke als SIMPACK-Streckendatei im *.trm-Format. Innerhalb des Gleisatlas-Servers liegen alle Streckendaten im ECEF-Koordinatensystem vor.

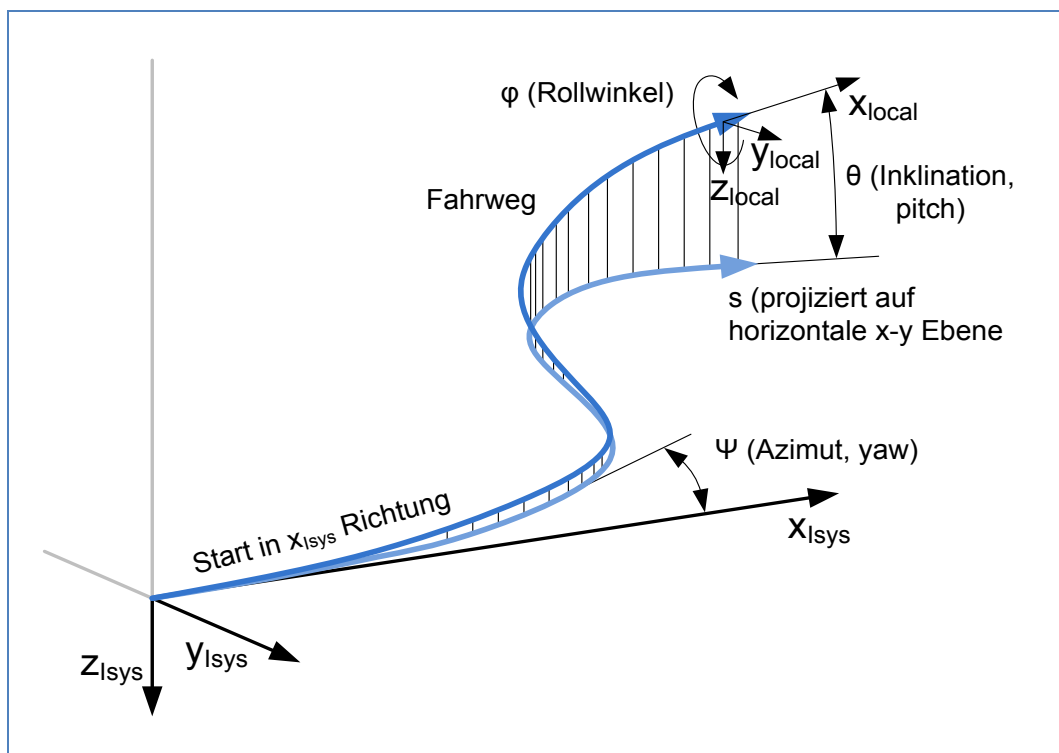


Abb. 51: SIMPACK-Streckendefinition im Basiskoordinatensystem I_{sys} mit Parameterdefinition nach SIMPACK-Dokumentation [111, Figure G.35.1]

Der im ECEF-Koordinatensystem vorliegende Polygonzug des Streckenverlaufes (Trasse) muss durch Koordinatentransformation (Anhang D.2.5) in ein lokales Koordinatensystem der Mehrkörpersimulation I_{sys} konvertiert werden. Die XY-Ebene des I_{sys} -Koordinatensystems ist eine horizontale Ebene, die am Koordinatenursprung tangential zum Referenzellipsoid (mit einem Höhenabstand zur Ellipsoidoberfläche) verläuft. Die Definition von Streckeninformationen ist in Abb. 51 aus der SIMPACK-Dokumentation dargestellt. Die Trasse beginnt im Koordinatenursprung und zeigt idealerweise in Richtung der X-Achse. Die Gleisüberhöhung wird zu jedem Punkt des Polygonzuges als vierter Parameter angegeben.

5.8.2 Schienenfahrzeugmodelle

Im Rahmen der Entwicklung dieser Simulationsumgebung wurden verschiedene Schienenfahrzeugmodelle implementiert. Sie sollen die Bandbreite der für die Entwicklung der Simulationsumgebung notwendigen Modelle und der bisher betrachteten Anwendungsfälle abdecken.

Je nach Anforderungen des Anwendungsfalls können die verschiedenen Mehrkörpersimulationsmodelle integriert werden. Ist ein detailliertes Mehrkörpersimulationsmodell nicht notwendig, kann man zur Minimierung der Gesamtkomplexität und Rechenzeit ein einfacheres Modell nutzen. Werden detaillierte Messsignale aus dem Mehrkörpersimulationsmodell benötigt oder sind die Fahrzeugeigenschaften des Mehrkörpersimulationsmodells Gegenstand der Untersuchung, ist ein detailliertes Modell zu verwenden. Neue Mehrkörpersimulationsmodelle werden durch eine Dateipfadänderung im Konfigurationsskript der Szenariosteuerung (und Anpassung der Modellschnittstellen) integriert.

Die Modellschnittstellen sind im SIMPACK- und im Simulink-Modell für die neue Anwendung anzupassen. Die Definition der Signale erfolgt in SIMPACK und wird automatisch an der Co-Simulationsschnittstelle SIMAT im Simulink-Modell aktualisiert. Die Verbindung des SIMAT-Blockes mit dem umgebenen Simulink-Modell muss der Benutzer manuell durchführen. Im Folgenden werden die implementierten Mehrkörpersimulationsmodelle, nach ansteigender Komplexität sortiert, beschrieben.

5.8.2.1 1-Körper-Modell

Dieses einfachste Modell beschreibt einen Körper, der sich entlang der Trasse bewegt und tangential zur Trasse ausgerichtet ist (Abb. 52).

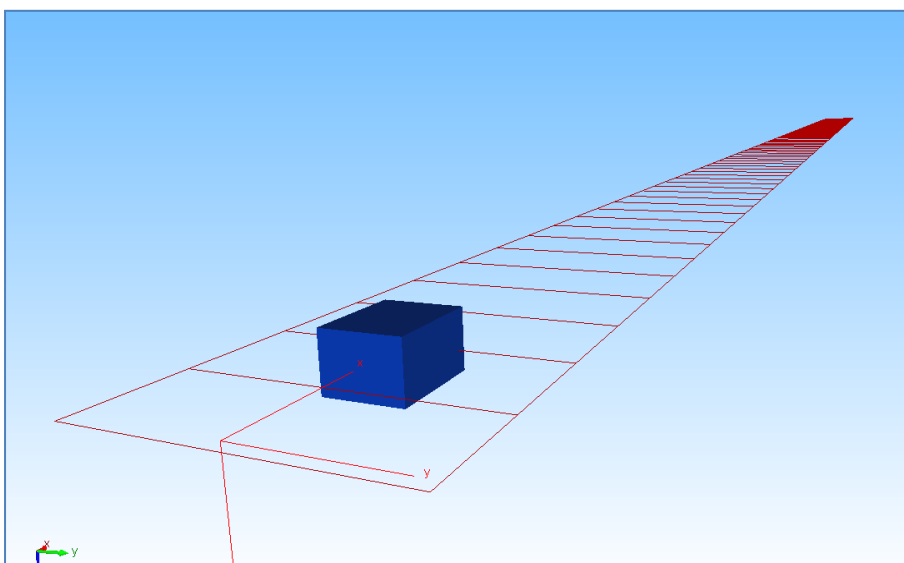


Abb. 52: SIMPACK-Darstellung des 1-Körper-Modells

Der Rollwinkel gegenüber der XY-Ebene entspricht der konfigurierten Überhöhung des Gleises.

Das Modell ist für einfache Bewegungsanalysen eines sich bewegenden Punktes vorgesehen. Häufig wird in Modellannahmen das zugrunde gelegte Fahrzeugmodell auf einen Punkt (z.B. das Phasenzentrum einer GNSS-Antenne) reduziert. Das Modell wurde zur Validierung der Simulationsumgebung, von der Streckendefinition im railML-Format bis zur Berechnung von Geopositionen des Körpers auf dem Fahrweg, genutzt.

Die Bewegung des Modells kann durch eine Positions- oder Geschwindigkeitsvorgabe erfolgen. Alternativ ist eine Kraft auf den Massekörper in tangentialer Richtung der Trasse möglich.

5.8.2.2 3-Körper-Modell

Das 3-Körper-Modell ist eine Erweiterung des 1-Körper-Modells und beschreibt den grundlegenden Aufbau eines Schienenfahrzeuges, bestehend aus zwei Drehgestellen und einem Wagenkasten (Abb. 53). Diese Komponenten wurden als drei Starrkörper modelliert. Die Drehgestellkörper weisen eine ideale Verbindung zur Gleiskurve wie im 1-Körper-Modell auf. Eines der Drehgestelle überträgt die Überhöhung des Gleises an den Wagenkastenkörper. Zur Vermeidung von Überbestimmtheit bei sich verändernder Überhöhung wird das zweite Drehgestell flexibel an den Wagenkasten angebunden.

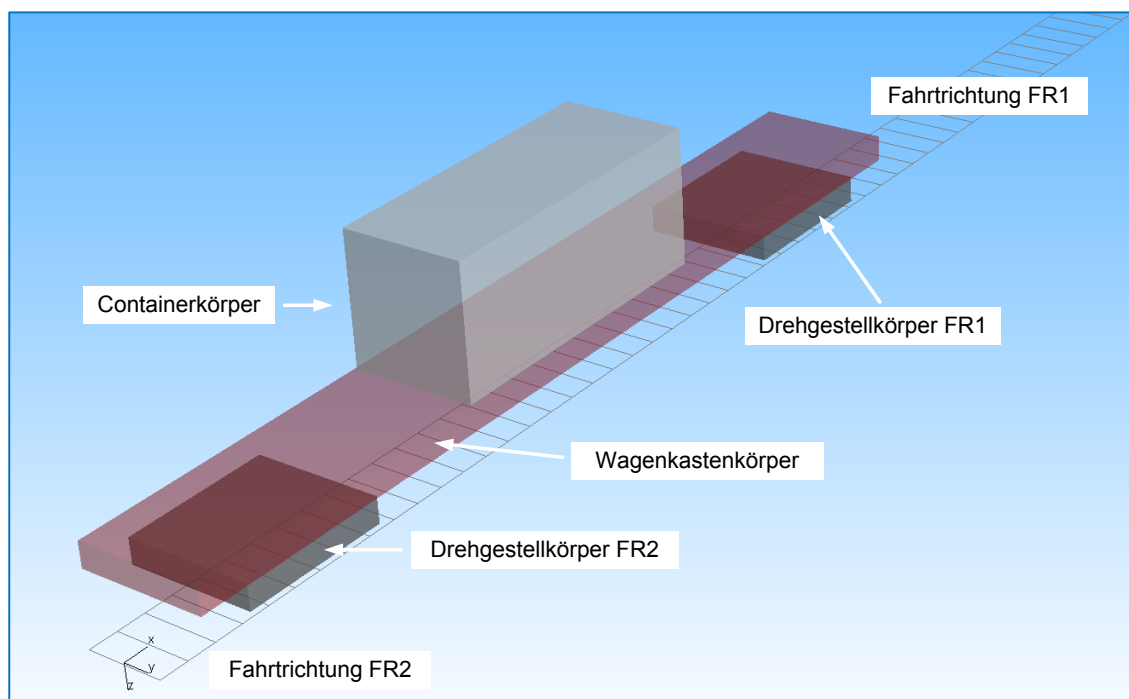


Abb. 53: SIMPACK 3-Körper-Modell, 3D-Ansicht

Die Position und Bewegung des Fahrzeuges lässt sich durch Vorgabe einer Position und Geschwindigkeit oder einer Kraft auf einen der Körper beeinflussen.

Die Abmessungen des implementierten Schienenfahrzeugmodells entsprechen dem Referenzfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“.

Mit diesem Modell lassen sich wichtige Eigenschaften der Bewegung eines Schienenfahrzeuges abbilden. So wird der Drehgestell-Ausdrehwinkel gegenüber dem Wagenkasten darstellbar. Der Wagenkasten ist über die Drehgestell-Drehpunkte an das Gleis angebunden. Durch den Abstand zwischen den zwei Drehkränzen (Lager zwischen Drehgestell und Wagenkasten) ergibt sich in Bögen ein Versatz des Wagenkastens zum Bogeninneren. Durch die Gleisüberhöhung ergibt sich über die Fahrzeughöhe ein seitlicher Versatz einer z.B. auf dem Dach angebrachten Satellitennavigationsantenne.

5.8.2.3 5-Körper-Modell

Das 5-Körper-Modell ist eine Variante des 3-Körper-Modells, das die grundlegenden geometrischen Eigenschaften des Versuchsfahrzeuges „IFS-Erprobungsträger 1“ (Anhang A) näher beschreibt. In Abb. 54 ist links die kommentierte 3D-Ansicht des SIMPACK-Modells und auf der rechten Seite die 2D-Struktur des Modells zu sehen.

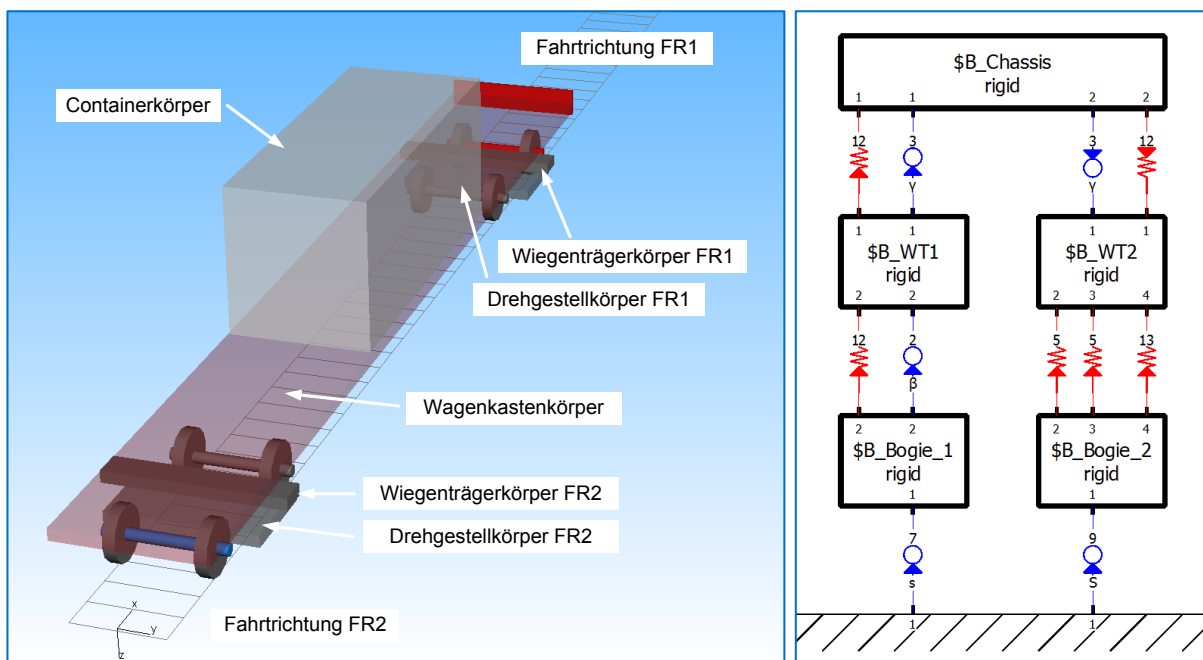


Abb. 54: SIMPACK 5-Körper-Modell, 3D-Ansicht (links), 2D-Ansicht (rechts)

Der Drehgestellkörper (\$B_Bogie_2) in Fahrtrichtung FR2 ist ideal mit der Mitte der Gleiskurve verbunden. Über diesen Joint kann die Distanz oder Geschwindigkeit des Drehgestells auf der Gleiskurve vorgegeben werden. Das erste Drehgestell (\$B_Bogie_1) weist einen Freiheitsgrad entlang der Gleiskurve auf. Zwischen dem Wagenkastenkörper (\$B_Chassis) und den Drehgestellkörpern wurde je ein

Wiegenträgerkörper ($\$B_WTx$) eingesetzt. Somit können die translatorische und rotatorische Relativbewegung zwischen Wagenkasten und Drehgestell getrennt werden. Der Wiegenträger hat einen festen Abstand und einen rotatorischen Freiheitsgrad gegenüber dem Wagenkasten. Zwischen dem zweiten Wiegenträger und dem zweiten Drehgestell werden beidseitig Sekundärfedern als Kraftelement 5 (Feder+Dämpfer) eingesetzt. Zur Reduzierung von translatorischen und rotatorischen Schwingungen sind dem Modell weitere Feder-Dämpfer-Elemente (Kraftelement 12/13) hinzugefügt worden. Alle Kraftelemente haben federnde und dämpfende Eigenschaften. Der Containerkörper ist fest mit dem Wagenkasten verschraubt und im Wagenkastenkörper ($\$B_Chassis$) enthalten.

Die dargestellten Radsätze sind grafische Elemente des Drehgestellkörpers. Zur vereinfachten Analyse wurden die erste Radsatzwelle rot und die vierte Radsatzwelle blau eingefärbt. Der Wagenkasten hat eine angedeutete Frontschürze in Fahrtrichtung FR1.

5.8.2.4 Gesamtfahrzeugmodell des IFS-Erprobungsträgers

Eine realistischere Beschreibung der mechanischen Schnittstelle zwischen dem Fahrweg (Gleis, Schiene) und dem Schienenfahrzeug (Rad) bildet das Rad-Schiene-Kontaktmodell. Es beschreibt einen komplexen Zusammenhang von geometrischen Eigenschaften und physikalischen Effekten am Berührungspunkt zwischen einem Rad und der Schiene.

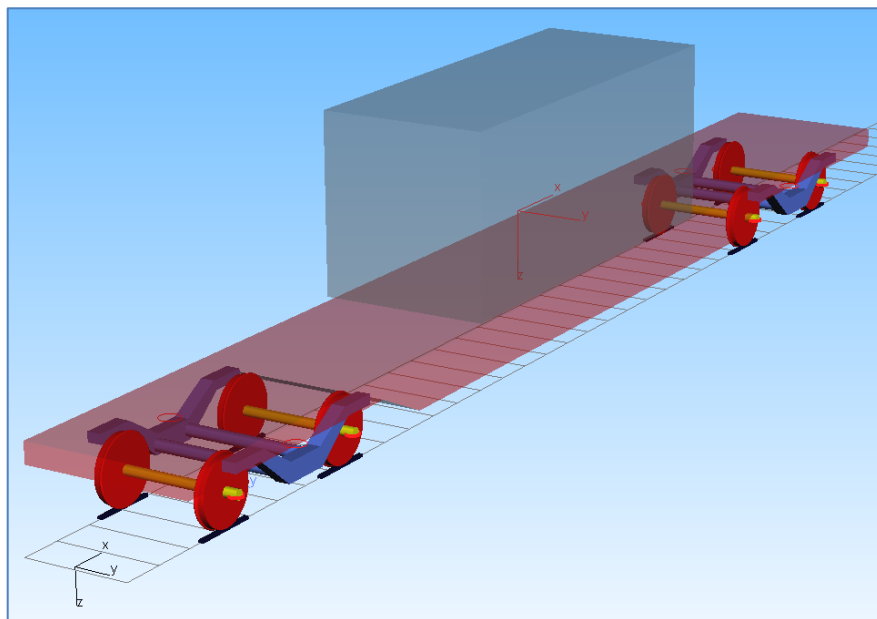


Abb. 55: Gesamtfahrzeugmodell des Versuchsfahrzeuges "IFS-Erprobungsträger 1", SIMPACK 3D-Ansicht

Um diese Schnittstelle in einer Erweiterung des 5-Körper-Modells nutzen zu können, wurden die Drehgestelle um eine Primärfederung und zwei Radsätze erweitert (Abb. 55). An jedem Radsatz befinden sich zwei Räder, für die jeweils ein Rad-Schiene-Kontaktmodell vorhanden ist. Die Räder auf der linken und der rechten Seite sind über eine Radsatzwelle zu einem Radsatz starr verbunden. Die Dimensionen und Eigenschaften des Drehgestells entsprechen dem Referenzfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ (siehe Anhang A).

Im Unterschied zu einer idealen Verbindung eines Körpers zu einer Gleiskurve sind in diesem Modell eine Querverschiebung des Radsatzes durch das Spiel im Spurkanal und ein Höhenversatz durch das Radprofil zu erwarten. Zusätzliche Fahrweganregungen sind konfigurierbar.

Über eine Sekundärfeder und einen Wiegenträger wird der Wagenkasten an zwei identische Drehgestelle angebunden. Zwischen dem Wiegenträger und dem Wagenkasten wird über den sogenannten Drehkranz eine ideale Drehung um die vertikale Achse zugelassen. Der Wiegenträger ist über die linke und rechte Sekundärfeder an den Drehgestellrahmen angebunden. Durch die gleichseitige Einfederung der Sekundärfeder ergibt sich eine vertikale Verschiebung zwischen Wiegenträger und Drehgestellrahmen. Durch eine unterschiedliche Einfederung der linken und rechten Sekundärfeder ergibt sich ein Winkeländerung (annähernd der Rollwinkel) zwischen Wiegenträger und Drehgestellrahmen. Bei einer Drehung des Drehgestellrahmens um seine Hochachse wird der Wiegenträger ideal mitgedreht.

5.9 Modellsystematik der Schienenfahrzeugsensorik

An realen Prüfständen werden die Systemzustände eines Untersuchungsobjektes durch Sensoren indirekt gemessen. Die Sensoren wandeln die gemessene physikalische Größe in ein elektrisches Signal, das durch eine Messkette aufbereitet wird, um dann digitalisiert weiterverarbeitet und gespeichert zu werden.

Auf dem IFS-Erprobungsträger werden die Sensorsignale durch ein Echtzeitsystem (RCP-System) aufgenommen, aufbereitet und daraus wieder auf die physikalischen bzw. technischen Systemzustände geschlossen. Die Software des RCP-Systems soll in einer Software-in-the-Loop-Simulation (Abschnitt 5.2) getestet werden. Hierfür werden alle Sensoreingänge des realen Fahrzeugsteuergerätes in der Simulation nachgebildet. So lassen sich auch einzelne Teile der Software oder Algorithmen in der Simulation vor einer realen Testfahrt untersuchen. Durch die Vorgabe von Störungen und Fehlerfällen in den Sensorsignalen kann man die korrekte Fehlerbehandlung und die Robustheit der Algorithmen und der Software untersuchen. Dies verringert die Anzahl der notwendigen Testfahrten und erhöht systematisch die Qualität der

Software. In diesem Modell wird somit die Lücke zwischen den in der Simulation vorhandenen idealen physikalischen Eigenschaften und den in der Realität vorhandenen Sensorsignalen geschlossen.

Aus dem eindimensionalen und dreidimensionalen Schienenfahrzeugmodell werden die modellierten Systemzustände berechnet und als ideale physikalische Eigenschaften verwendet. Separate Sensormodelle enthalten die Eigenschaften und Schnittstellen der Sensoren.

Ein Sensorsignal wird technisch in mehreren Schritten erzeugt. Dies bildet hier ein physikalisches und ein technisches Modell des Sensors ab (Abb. 56). Zu beiden Teilmodellen gibt es zusätzlich je ein Störungs- und Fehlermodell, in dem dem Signal optional Störungen und Fehler aufgeprägt werden. Als Störungen werden hier kontinuierliche physikalisch oder technisch bedingte Abweichungen von dem wahren physikalisch gemessenen Wert angesehen. Hierzu zählen alle klassischen „Messfehler“. Als Fehler werden Fehlerzustände des Sensors bezeichnet, die das Sensorsignal durch einen Defekt oder Ausfall von Komponenten des Sensors beeinflussen. Die Bezeichnung „Fehler“ wird in dieser Arbeit durchgängig nur für Fehlerzustände angewendet.

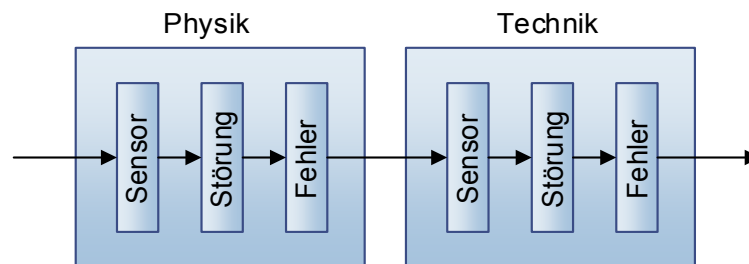


Abb. 56: Struktur eines Sensormodells

Grundsätzlich ist diese Methode für jeden Sensor anwendbar. Im Folgenden wird das allgemeine Berechnungsverfahren eines Sensormodells im Detail vorgestellt. Anschließend wird für jedes implementierte Sensormodell die Kette der Teilmodelle beschrieben.

5.9.1 Sensor-Physikmodell

In diesem Modell werden die aus den Fahrzeugmodellen berechneten idealen physikalischen Eigenschaften in die ideale physikalische Messgröße des Sensors gewandelt, so wie der Sensor es in seiner Einbaulage aufnimmt. Bei intelligenten Sensoren können auch mehrere physikalische Größen (in einem Simulink-Bus) zusammengefasst werden. Beispiele:

- Der Federweg wird durch einen Hebel mit ungleichen Seitenlängen indirekt durch einen Linearsensor gemessen.
- Der Federweg wird durch eine Hebelstange als Winkel am Sensor gemessen.

5.9.2 Physik-Störungsmodell

Störungen werden in Form von systematischen und zufälligen Abweichungen dem physikalischen Sensorsignal aufgeprägt. Dies ist durch die Modellierung von bekannten physikalisch beschreibbaren Störeinflüssen möglich oder kann eine rein funktionale Beschreibung von Störeeigenschaften sein. Auch die physikalische Wandlungsdauer des Sensors ist zu berücksichtigen, wenn sie in einem relevanten Zeitbereich liegt.

5.9.3 Physik-Fehlermodell

Alle Sensoren können nach einem Fehler (mit einer Fehlfunktion) ausfallen. Den erkannten Ausfallszenarien des Sensors werden Fehlerbilder zugeordnet, die wertbasierte und zeitbasierte Eigenschaften haben. So kann das Sensorsignal in einem Fehlerbild bestimmte Werte annehmen und die Werte mit einem charakteristischen Zeitverhalten ändern. In der vorliegenden Implementierung treten bei fehlerhaften Sensorsignalen folgende Eigenschaften auf:

- Wertbasiert: null, konstanter Wert, Rauschen
- Zeitbasiert: einzeln, sporadisch, periodisch, kontinuierlich

Fehlerzustände können in der vorliegenden Implementierung distanz-, geschwindigkeits-, zeitbasiert und durch das Signal selbst ausgelöst werden.

Zur systematischen Ermittlung von möglichen Fehlerszenarien, in denen die Sensoren durch eine technische Fehlfunktion einen falschen Messwert ausgeben, wurde eine Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) angefertigt (siehe Anhang D.1). Die Analyse ordnete die ermittelten Fehlfunktionen systematisch ein. Daraus werden die Fehlermodelle erstellt.

5.9.4 Sensor-Technikmodell

In dieser Funktion wird die gemessene und vom Sensor verarbeitete physikalische Eigenschaft in die am Sensorausgang technisch anliegende (meist elektrische) Messgröße gewandelt.

Für analoge Spannungs- und Stromschnittstellen liegt ein zeitlich kontinuierliches elektrisches Signal an. Die charakteristische Frequenz von sinusförmigen oder digitalen Frequenzsignalen wird in der Einheit Hertz [Hz] angegeben. Für pulsweitenmodulierte Signale (PWM) gibt man ein Tastverhältnis (in Prozent [%]) innerhalb einer PWM-Periode an. Für serielle, parallele und paketbasierte digitale Schnittstellen ist ein auf die Schnittstelle und Anwendung angepasstes Modell zu entwickeln.

5.9.5 Technik-Störungsmodell

Analoge Messsignale werden meist durch einen Offset und Messrauschen beeinflusst. Ein zeitlicher Versatz muss berücksichtigt werden, wenn die analogen Signale (analog oder digital) gefiltert wurden.

Für halbdigitale und digitale Schnittstellen wird die (sich aus der Taktung oder dem Protokoll ergebende) zeitlich verzögerte Übertragung der Informationen ereignisgesteuert ausgelöst. Für halbdigitale Schnittstellen, wie bei pulswertenmodulierten Schnittstellen (PWM) oder Frequenzschnittstellen, wird der charakteristische Parameter dieser Schnittstelle, z.B. Frequenz oder Periodendauer, als Wert benutzt. Da sich die messbaren Signale dieser Schnittstellen nur in einem diskreten zeitlichen (veränderlichen) Raster ändern, wird auch das simulierte Messsignal in diesem Modell getaktet und nach einer Totzeit ausgegeben.

Pulsweitenmodulierte Signale weisen ein festes zeitliches Raster der PWM-Periode auf. Innerhalb dieser Periode kann nur ein Wert, das PWM-Tastverhältnis, übergeben werden.

(Halb-)Digitale Frequenzsignale kodieren ihren Messwert in den Flankenabstand eines digitalen Rechtecksignals. Durch die sich daraus ergebenden (unterschiedlichen) Wartezeiten zwischen zwei Flanken ergibt sich die Totzeit dieses Signals.

Seriell-, Feldbus- oder Ethernet-Schnittstellen übertragen die Signale protokoll- bzw. paketbasiert. Jedes Paket benötigt eine gewisse Zeit um die Bits auf der Busleitung zu übertragen und in der empfangenden Elektronik wieder einzulesen.

5.9.6 Technik-Fehlermodell

In diesem Modell werden dem gestörten technischen Sensorsignal mögliche Fehlerzustände aufgeprägt. Funktional entspricht dieses Modell dem in Abschnitt 5.9.3 beschriebenen Fehlermodell.

5.10 Eindimensionale Bewegungssensorik am Schienenfahrzeug

Als eindimensionale Sensoren werden hier Sensoren bezeichnet, die die Bewegung eines Schienenfahrzeuges in einer Bewegungsrichtung durch einen einzelnen Wert quantitativ beschreiben.

Am Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“, dem hier verwendeten Referenzfahrzeug für die Simulationsumgebung, sind verschiedene eindimensionale Fahrzeugsensoren angebaut, die in Anhang A beschrieben werden. Die Simulations-

umgebung soll diese Signale erzeugen. Im Folgenden werden zu jedem dieser Sensoren der Aufbau und die Konfiguration der physikalischen und technischen Sensor-, Störungs- und Fehlermodelle beschrieben.

5.10.1 Radimpulsgeber

Durch die translatorische Relativbewegung des Schienenfahrzeuges über dem ortsfesten Fahrweg führen die Radsätze eines Schienenfahrzeuges eine charakteristische Drehbewegung aus. Die Drehbewegung der Radsätze wird durch Winkelsensorik (z.B. Radimpulsgeber oder Encoder) gemessen. Radimpulsgeber nehmen an allen vier Radsätzen des Versuchsfahrzeuges „IFS-Erprobungsträger 1“ deren Drehbewegung auf. Das Sensorprinzip wurde in Abschnitt 2.4.1 beschrieben. Die Verwendung der Sensoren am IFS-Erprobungsträger wird in Anhang A.5.3 dargestellt. Die in diesem Abschnitt vorgestellte Winkelmessung eines auf der Schiene abrollenden Radsatzes lässt sich auch auf Sensoranordnungen mit einem Encoder am Radsatz und drehmomentfrei mitlaufende Messräder mit Encoder (Anhang A.5.1) anwenden.

In einer Mehrkörpersimulation gibt es mindestens zwei grundlegende Verbindungsmöglichkeiten zwischen einem Schienenfahrzeug und dem Fahrweg. Im 5-Körper-Modell nach Abschnitt 5.8.2.3 bewegt sich ein starrer (Drehgestell-)Körper eindimensional entlang des Fahrweges. Der Realität näher ist die Modellierung von Radsätzen (in einem Drehgestell nach Abschnitt 5.8.2.4), die mit einem Rad-Schiene-Kontaktmodell entlang des Fahrweges rollen. Dieses Sensormodell ist für beide Fahrzeugmodelle anwendbar. Anpassungen werden in separaten Absätzen beschrieben.

5.10.1.1 Sensor-Physikmodell

Mehrkörpersimulation - Fahrzeugmodell mit Radsätzen

Durch die Relativbewegung des Fahrzeuges über dem Fahrweg ergibt sich in der Mehrkörpersimulation eine Rotationsbewegung der Radsätze um die Y-Achse. Der Rotationswinkel und die Rotationsgeschwindigkeit werden in der Mehrkörpersimulation durch einen konfigurierten Sensor bestimmt.

Mehrkörpersimulation - Fahrzeugmodell ohne Radsätze

Das in Abschnitt 5.8.2.2 dargestellte 5-Körper-Modell beschreibt eine ideale Bewegung eines Drehgestells entlang der Gleismitte. Im Mehrkörpersimulationsmodell sind nur die zurückgelegte Distanz und die aktuelle Geschwindigkeit des Fahrzeuges verfügbar. Das Sensormodell berechnet aus der zurückgelegten Distanz die Radumdrehungen des Radsatzes als Gesamtwinkel φ_{ges} .

Aus der letzten nicht vollständigen Radumdrehung lässt sich die aktuelle Winkelstellung (Drehwinkel) des Radsatzes φ_{Rad} bestimmen:

$$\varphi_{Rad} = modulo(\varphi_{ges}, 2\pi) \text{ [rad]} \quad (12)$$

Mit dem Gesamtwinkel φ_{ges} und der Anzahl der Zähne auf dem Umfang der Kodierscheibe n_{KS} wird die Anzahl der steigenden Zahnflanken bestimmt:

$$n_{ges} = \frac{\varphi_{ges}}{2\pi \text{ rad}} \cdot n_{KS} \text{ [-]} \quad (13)$$

Aus dem effektiven Rollradius der Räder des Radsatzes R_{Rad} ergibt sich der abrollende Radumfang:

$$U_{Rad} = 2 \cdot \pi \cdot R_{Rad} \text{ [m]} \quad (14)$$

Die Relativgeschwindigkeit v_{Fzg} ist bei gegebenem Radumfang U_{Rad} direkt in die Rotationsgeschwindigkeit des Radsatzes $\omega_{Radsatz ideal}$ umzurechnen:

$$\omega_{Radsatz ideal} = \frac{v_{Fzg}}{U_{Rad}} \cdot 2\pi \text{ [rad]} \quad (15)$$

5.10.1.2 Physik-Störungsmodell

Bei einem idealen Abrollvorgang sind die Fahrzeuglängsgeschwindigkeit und die Radumfangsgeschwindigkeit im Radaufstandspunkt gleich groß. Real wird der Abrollvorgang jedoch durch verschiedene physikalische Einflüsse beeinflusst, die hier in einem Störungsmodell zusammengefasst sind.

Mehrkörpersimulation - Fahrzeugmodell mit Radsätzen

In der Mehrkörpersimulation können dem Rad-Schiene-Kontaktmodell realitätsnahe Eigenschaften als Störungen des idealen Abrollvorganges konfiguriert werden. Daraus entsteht ein komplexer Zusammenhang zwischen der Relativbewegung (Fahrzeug-Fahrweg) und der Radsatzdrehung.

Mehrkörpersimulation - Fahrzeugmodell ohne Radsätze

Die ideale Abrollung des Radsatzes wird durch Schlupf zwischen Rad und Schiene verändert. Der Längsschlupf s_x ist nach Schindler [112, S.33f] folgendermaßen definiert:

Radumfangsgeschwindigkeit:

$$u_{Rad} = \omega_{Radsatz ideal} \cdot R_{Rad} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (16)$$

Längsgleitgeschwindigkeit:

$$w_x = v_{Fzg} - u_{Rad} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (17)$$

Die ideale Radsatz-Rotationsgeschwindigkeit $\omega_{Radsatz\ ideal}$ wird in die schlupf-behaftete Radsatz-Rotationsgeschwindigkeit ω_u umgewandelt.

Für ein treibendes Rad mit: $u_{Rad} \geq v_{Fzg}$ gilt:

$$s_x = \frac{w_x}{u_{Rad}} \rightarrow \omega_u = \omega_{Radsatz\ ideal} \cdot (1 - s_x) \quad [rad/s] \quad (18)$$

Für ein gebremstes Rad mit $u_{Rad} < v_{Fzg}$ gilt:

$$s_x = \frac{w_x}{v_{Rad}} \rightarrow \omega_u = \frac{\omega_{Radsatz\ ideal}}{1 + s_x} \quad [rad/s] \quad (19)$$

Der Längsschlupf s_x wird vereinfacht als linear abhängig von der Fahrzeug-beschleunigung angenommen:

$$s_x = f(a_{Fzg}) = s_{const} \cdot a_{Fzg} \cdot (-1) \text{ mit } s_{const} = 0..1 \quad (20)$$

Der Radsatzgesamtwinkel ergibt sich aus der Integration der schlupf-behafteten Radsatz-Rotationsgeschwindigkeit:

$$\varphi_u = \int \omega_u dt \quad [rad] \quad (21)$$

Die schlupf-behaftete Radumfangsgeschwindigkeit ergibt sich analog zu Formel (16):

$$u_{RadSchlupf} = \omega_u \cdot R_{Rad} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (22)$$

Stochastische Veränderungen der Radsatz-Rotationsgeschwindigkeit, die durch einen komplexen Abrollvorgang hervorgerufen werden, sind in Form eines Rausch-generators berücksichtigt. Auf eine weitere Implementierung der bekannten physikalischen Effekte [51] wurde hier verzichtet.

5.10.1.3 Physik-Fehlermodell

Nicht implementiert.

5.10.1.4 Sensor-Technikmodell

Am Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ sind an allen Radsätzen lagerlose Radimpulsgeber (Anhang A.5.3) verbaut. Die Radsatzdrehung wird technisch auf eine Kodierscheibe mit n_{KS} radial angeordneten (Zahnrad-)Zähnen (Abb. 10) übertragen. Die kontinuierliche (schlupfbehafte) Radsatz-Rotationsgeschwindigkeit ω_u wird in eine zeit- und wertekontinuierliche Zahnflanken-Pulsfrequenz f_{RIG} umgerechnet:

$$f_{RIG} = \frac{\omega_u}{2\pi} \cdot n_{KS} \quad \left[\frac{1}{s} \right] \quad (23)$$

In einer virtuell an den Sensor angeschlossenen Auswerteeinheit wird das Rechtecksignal ausgewertet. Ein Counter-Modul zählt die Pulse und gibt die Anzahl der gezählten Pulse weiter. Der kontinuierliche Radsatzwinkel φ_u wird hierzu in eine zeit- und wertekontinuierliche Zahnanzahl n_{RIG} umgerechnet.

$$n_{RIG} = \frac{\varphi_u}{2\pi} \cdot n_{KS} \quad [-] \quad (24)$$

Bei der Frequenzmessung wird technisch der zeitliche Abstand zwischen zwei steigenden oder fallenden Flanken vermessen und die aktuellste Messung als Frequenzwert ausgegeben. In diesem Modell ist die Pulsfrequenz bekannt, und die zeit- und wertekontinuierliche Pulsperiodendauer Δt_{puls} kann bestimmt werden.

$$\Delta t_{puls} = \frac{1}{f_{RIG}} \quad [s] \quad (25)$$

Sensoren mit zwei Sensorkanälen messen mit zwei um einen Viertel Zahnabstand (und um N halbe Zahnabstände) versetzten Sensorelementen die Winkelposition der Kodierscheibe.

In diesem Modell soll die Erzeugung des analogen Rechteckfrequenzsignals als Sensorausgangssignal mit anschließender hochfrequenter Abtastung in einem simulierten Frequenzeingang einer Messelektronik vermieden werden. Die analoge Signalübertragung und Abtastung wird überbrückt, und die in der Messelektronik (aus der eingelesenen Rechteckfrequenz) erzeugten Zeit- und Frequenzmesssignale das Rechtecksignal beschreiben.

Durch den technischen Aufbau des Sensors geht der absolute Bezug zwischen Drehwinkel des Radsatzes und gemessenem Winkel verloren, sodass sich nachfolgende Berechnungen auf die Integration der Winkelgeschwindigkeit beziehen. Durch ein Indexsignal eines Encoders lässt sich der absolute Bezug zum Drehwinkel des Radsatzes (eine Umdrehung) wieder hergestellt. (Dieser Kanal ist bei Radimpulsgebern nicht vorhanden.)

5.10.1.5 Technik-Störungsmodell

Im Folgenden werden die auf das technische Sensorsignal wirkenden Störungen beschrieben.

Der Informationsgehalt des Sensorsignals ist zeitlich diskretisiert, da nur bei einer Zustandsänderung vor dem Sensorelement (ein Zahn/kein Zahn) eine neue Information verfügbar ist. Dieses Verhalten wird in dem Modell umgesetzt, indem ein neues Inkrement des Zahnanzahlsignals n_{RIG} als Trigger für die Auslesung einer neuen steigenden Zahnflanke des Rechtecksignals interpretiert wird. Zu diesem Zeitpunkt wird die zeitdiskrete und wertekontinuierliche Zahnflanken-Pulsfrequenz $f_{RIG\ diskret}$ mit dem Wert der zeit- und wertekontinuierlichen Zahnflanken-Pulsfrequenz f_{RIG} aktualisiert. Zwischen zwei Flanken ist die zeitdiskrete Zahnflanken-Pulsfrequenz $f_{RIG\ diskret}$ konstant. Die Zeitdauer zwischen zwei Zahnflanken wird als Periodendauer des im vergangenen Zeitraum gemittelten Frequenzsignals $f_{RIG\ diskret\ verzögert}$ interpretiert. Sie ist zur Geschwindigkeit umgekehrt proportional und liegt besonders bei niedrigen Geschwindigkeiten in einem relevanten Zeitbereich.

Systematische, sich wiederholende Störungen der Zahnflankenzeitpunkte werden durch mechanische Toleranzen der Winkelposition der Kodierscheibenzähne und (theoretisch) durch Unrundheiten der Lauffläche des Rades hervorgerufen.

Das Zahnanzahlsignal n_{RIG} einer Encoderschnittstelle weist eine in der Messelektronik festgelegte Bitbreite auf. Übersteigt die Anzahl der eingelesenen Kodierscheibenzähne den für dieses Zahlenformat mit der Bitbreite darstellbaren Zahlenbereich, wird die Variable mit dem für das Zahlenformat typische Überlaufverhalten weitergezählt.

Durch mechanische Toleranzen ergeben sich Unterschiede in der Zahnbreite und im Zahnabstand, die zu einer verfrühten oder verspäteten Zahnflanke führen. Im Verlauf einer Umdrehung müssen sich die Toleranzen der Zahnflanken ausgleichen, um insgesamt die Definition eines Umdrehungswinkels von 360° nicht zu verletzen. Eine einzelne Zahnbreitendiskontinuität ist im Geschwindigkeitssignal durch zwei symmetrische Peaks um einen gemeinsamen Mittelwert gekennzeichnet.

Stochastische Störungen sind dem Rechtecksignal überlagertes Signalrauschen, das zu einer zeitlichen Verschiebung der Flankenzeitpunkte führt. In digitalen Schaltungen wird die Zeitdauer als Anzahl von ganzzahligen Taktzyklen einer internen Taktfrequenz gemessen. Durch die Zeitdiskretisierung auf ganzzahlige Takte entsteht eine zeitliche Unschärfe der Flankenzeitpunkte, die der Periodendauer der internen Taktfrequenz entspricht. Die Quantelung der Zeitdauer zwischen zwei steigenden Flanken führt zu einem Jitter der Frequenzmessung.

In dem Modell werden die systematischen und stochastischen Störungen vereinfacht

als unabhängiges und geschwindigkeitsabhängiges, weißes Messrauschen auf das zeit- und wertekontinuierliche Pulsfrequenzsignal f_{RIG} aufgeprägt. Aus der verrauschten Zahnflanken-Pulsfrequenz $f_{RIG\ rausch}$ wird das verrauschte Zahnanzahlsignal $n_{RIG\ rausch}$ integriert. Die Diskretisierung und Mittelung der verrauschten Zahnflanken-Pulsfrequenz $f_{RIG\ rausch}$ zu $f_{RIG\ diskret\ rausch}$ und $f_{RIG\ diskret\ verzögert\ rausch}$ wird an den Flankenzeitpunkten des verrauschten Zahnanzahlsignals $n_{RIG\ rausch}$ durchgeführt.

5.10.1.6 Technik-Fehlermodell

Die Fehlereigenschaften sind den in Abschnitt 5.9.3 beschriebenen, generischen Fehlermodell entnommen. In der in Anhang D.1 abgelegten FMEA sind den generischen Fehlerfällen mögliche Fehlerursachen zugeordnet.

5.10.2 Doppler-Radar-Geschwindigkeitssensor

Auf Basis des Doppler-Effektes wurden Radarsensoren (Anhang A.5.4) entwickelt, die unter einem Schienenfahrzeug berührungslos die Relativgeschwindigkeit zwischen Wagenkasten und Gleisbett messen. Dies ist ein, gegenüber den Radsatzdrehung messenden Sensorprinzipien, komplementäres Sensorprinzip.

Der Sensor wird als Blackbox-System modelliert. Die gemessene Relativgeschwindigkeit des Sensormodells entspricht der in Abschnitt 5.7.1 berechneten eindimensionalen Fahrzeuggeschwindigkeit. Auf die Erstellung von Statussignalen und Integritätsinformationen wird hier verzichtet.

5.10.3 Correvit-Geschwindigkeitssensor

Der Correvit-Sensor basiert auf einem optischen Messprinzip, das die Relativgeschwindigkeit zwischen dem Drehgestell (auf einer Seite) zum Schienenkopf misst (Abb. 142). Der Aufbau und die grundlegende Funktionsweise des Correvit-Sensors werden in Anhang A.5.2 vorgestellt.

Das Sensormodell des Correvit-Sensors wird in ein allgemeines Sensor-Physikmodell, ein Technikmodell, ein Technik-Störungsmodell und ein Technik-Fehlermodell geteilt.

Das Sensor-Physikmodell enthält die funktionale Modellierung des physikalischen Messprinzips, in dem aus der idealen Geschwindigkeit des simulierten Schienenfahrzeuges die Geschwindigkeit und Distanz erzeugt wird. Auf die Modellierung der Geschwindigkeits- und Distanzänderung durch die Krümmung der Gleiskurve in einem Physik-Störungsmodell wird hier verzichtet.

Im Sensor-Technikmodell werden zu den physikalischen Messgrößen Distanz und Geschwindigkeit verschiedene technische Status- und Messgrößen zur Stillstands-

erkennung, der Sensortemperatur, der Beleuchtungsintensität und dem geschätzten Verschmutzungsgrad des Schutzglases ergänzt. In einem Technik-Störungsmodell werden die physikalischen Messgrößen Distanz und Geschwindigkeit durch einen Rauschgenerator und Offset beeinflusst. Das Technik-Fehlermodell wirkt auf das Geschwindigkeitssignal mit den in Abschnitt 5.9.3 vorgestellten Fehlereigenschaften.

5.11 Umgebungsfeste 3D-Sensorik (Wegmarken)

Im Gleis verlegte Wegmarken werden als dreidimensionale umgebungsfeste Positionssensorik angesehen. Ein Lesegerät auf dem Schienenfahrzeug detektiert die Wegmarken bei einer Überfahrt und liest deren Daten aus. Zur Modellierung dieser Sensorik werden die Eigenschaften des Fahrweges mit Zuständen des fahrenden Schienenfahrzeuges kombiniert.

In der Simulationsumgebung benötigt das ETCS-Fahrzeugsteuergerät im Gleis verlegte ETCS-Eurobalisen (ETCS-Festdatenbalisen) als Positionsreferenz. Auf dem Referenzfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ werden alternative Wegmarken eingesetzt (Anhang A.7.4), die über ein RFID-System ausgelesen (und über einen vertikalen Abstandslaser genauer vermessen) werden. Die Modellierung dieser Systeme wird im Folgenden beschrieben.

5.11.1 ETCS-Eurobalisensimulator (Distanzbasierte Wegmarken)

Das Modell stellt einen generischen ETCS-Eurobalisenempfänger auf dem Schienenfahrzeug dar, der bei Überfahrt über eine ETCS-Eurobalise den Dateninhalt der ETCS-Festdatenbalise ausgibt (siehe Abschnitt 5.4.5). Die Schnittstelle des realen ETCS-Eurobalisenempfängers ist herstellerabhängig und nicht bekannt. Die Funktion ist deshalb als Blackbox Modell funktional implementiert. Die eingelesenen Daten über der Luftschnittstelle zwischen ETCS-Eurobalise und ETCS-Eurobalisenempfänger werden in diesem Modell wie in SUBSET-026 spezifiziert ausgegeben. In der vorhandenen Implementierung wird von einem idealen Sensor ohne Störungen oder Fehler ausgegangen.

5.11.2 Sensor-Physikmodell

Bei der Streckengenerierung (Abschnitt 4.7) werden die ETCS-Eurobalisen (Festdatenbalisen) als Teil eines Streckenelementes angelegt (Abb. 57). Innerhalb einer Balisengruppe haben die Balisen eine gemeinsamen Gruppennummer („groupID“). Sie unterscheiden sich durch ihren Index („ndx“) und die Position („pos“). Die Position wird als Länge in Metern auf der Gleiskurve des Streckenelementes, vom Startpunkt des Streckenelementes aus, definiert.

```

<ocsElements>
...<balises>
...<balise groupID="9" id="bal_PCW_T1_Gleis_120_Gerade_1_trackBegin_1" ndx="0" pos="2"/>
...<balise groupID="9" id="bal_PCW_T1_Gleis_120_Gerade_1_trackBegin_2" ndx="1" pos="4"/>
...</balises>
</ocsElements>

```

Abb. 57: Ausschnitt aus einer railML-Datei, Definition von zwei ETCS-Eurobalisen der Balisengruppe 9 als Teil des Streckenelementes „PCW_T1_Gleis_120_Gerade_1“

Der Streckenatlas-Server liest die Streckendefinition als Konfiguration ein. Vor jeder Teilsimulation stellt der Streckenatlas-Server dem Simulink-Zentralmodell eine MATLAB-Datenstruktur zur Verfügung, in der die Positionen aller ETCS-Festdatenbalisen als Distanz vom aktuellen Startpunkt auf der Gleiskurve enthalten sind.

Auf dem Schienenfahrzeug ist die Position der Balisenantenne im Wagenkasten-Koordinatensystem (KS-WK) definiert (Abb. 58). Aus dem Abstand zwischen der Drehkranzposition und der Antennenposition des ETCS-Eurobalisenempfängers in X-Richtung (Fahrzeuginnenrichtung) im Wagenkasten-Koordinatensystem (KS-WK) wird die Distanz $s_{balE,WK}$ abgeleitet. Die Position der ETCS-Eurobalisenantenne (BA) auf der Gleiskurve s_{balE} bestimmt sich aus der Distanz des Referenzpunktes des Fahrzeuges auf der Gleiskurve $s_{Tr,DG1}$ sowie dem Abstand zwischen Referenzpunkt und der Balisenantenne auf dem Wagenkasten $s_{balE,WK}$ (Abb. 58). Einflüsse durch eine gekrümmte Gleiskurve unter dem Wagenkasten oder Gleisüberhöhung werden vernachlässigt.

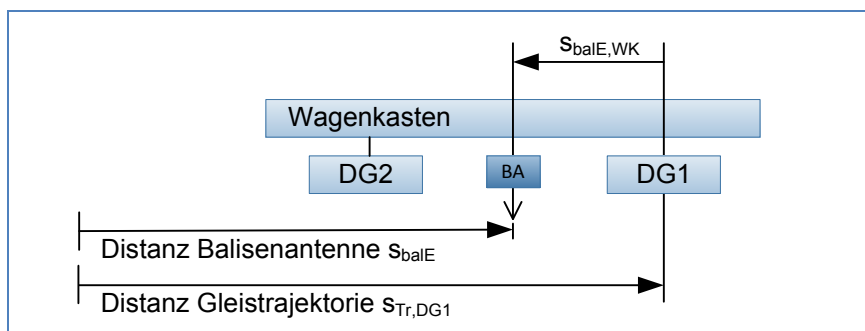


Abb. 58: Distanz des Balisen-Lesegerätes auf der eindimensionalen Gleiskurve

Der ETCS-Eurobalisensimulator vergleicht zur Simulationszeit die Positionen aller Balisen auf der Gleiskurve mit der Distanz des Balisen-Lesegerätes auf der Gleiskurve (Abb. 59). Die Balise, die den geringsten Abstand zum Balisen-Lesegerät und eine geringere Distanz als das Balisen-Lesegerät zum Startpunkt hat, wird als die als letztes passierte Balise angesehen.

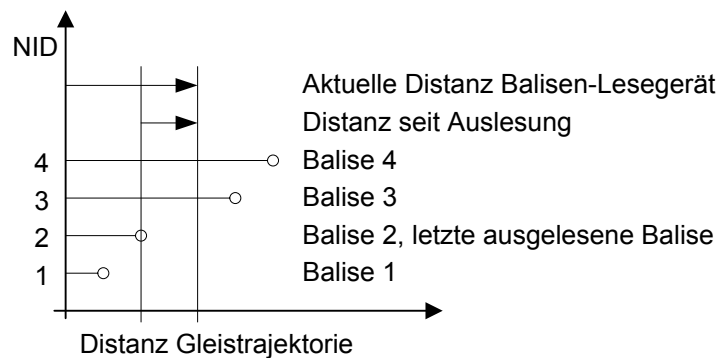


Abb. 59: Distanzberechnung zwischen Balise und Balisen-Lesegerät

Die Implementierung benutzt keine zu speichernden Zustände für die zuletzt überfahrene Balise, da hier ein Modell der Streckeneigenschaften und nicht der Empfängerlogik modelliert wird. Für das eindimensionale Modell des Fahrweges ist die Position der ETCS-Eurobalisen eindeutig.

5.11.2.1 Sensor-Technikmodell

Abb. 60 zeigt die funktionale Implementierung eines ETCS-Balisenlesegerätes.

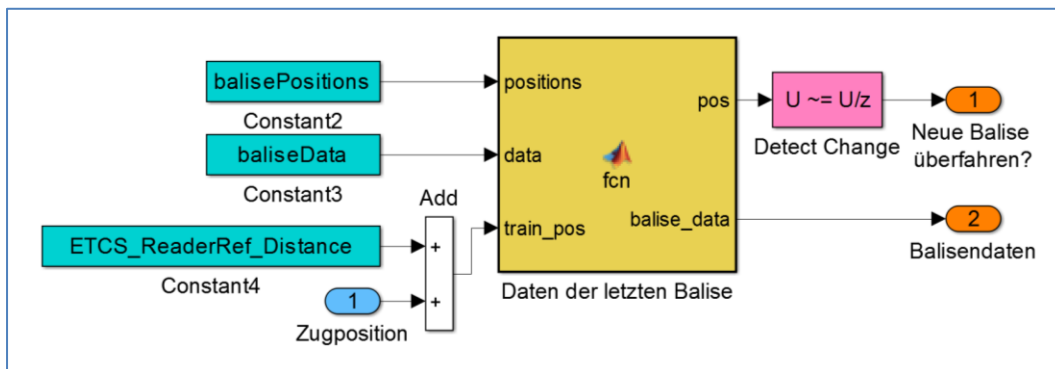


Abb. 60: Implementierung des ETCS-Eurobalisenempfängers

Der Dateninhalt aller Festdatenbalisen wird in der Datenstruktur „baliseData“ übergeben. Aus der aktuellen eindimensionalen Fahrzeugposition „Zugposition“ wird mit der Variable „ETCS_ReaderRef_Distance“ (entspricht $s_{balE,WK}$) die Position der ETCS-Balisenantenne unter dem Schienenfahrzeug bestimmt. Aus der Position der ETCS-Balisenantenne und den Balisenpositionen entlang des Fahrweges wird die zuletzt passierte Balise bestimmt und dann der Dateninhalt der Balise aus der Datenstruktur selektiert. Der zuletzt ausgelesene Datensatz wird als aktuellster Datensatz des Balisen-Lesegerätes in einem Simulink-Array „Balisendaten“ an die Schnittstelle des ETCS-Fahrzeugsteuergerätes (Abschnitt 5.4.5) ausgegeben. Auf eine Konvertierung der Balisendaten in das in SUBSET-026 definierte Format einer Zeichenkette (Bitarray) wird hier verzichtet.

5.11.3 RFID-Wegmarken-Sensorik (Wegmarke mit 3D-Position)

In dem Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ ist an beiden Fahrzeugspitzen je eine RFID-Antenne mit einem Lesegerät verbaut. Auf Testfahrten werden integrierte Wegmarken (Anhang A.7.4) mit einem RFID-Transponder/RFID-Tag (Abb. 126) ausgelegt und deren Position geodätisch eingemessen (Anhang B.5). Bei der Überfahrt einer RFID-Antenne über einen RFID-Transponder wird dessen Dateninhalt eingelesen, und gleichzeitig wird eine Intensitätskurve des von der RFID-Antenne empfangenen Hochfrequenzsignals aufgezeichnet. Aus dem Dateninhalt des Transponders ist bekannt, welche Wegmarke ausgelesen wurde. Aus der Intensitätskurve (RSSI) kann mit einer Peakvermessung genauer auf die Position des RFID-Transponders im Empfangsbereich der RFID-Antenne geschlossen werden.

In diesem Modell werden die beiden RFID-Antennen an den Spitzen des IFS-Erprobungsträgers nachgebildet. Die Position der Antennen ist im Wagenkasten-Koordinatensystem (KS-WK) definiert (Anhang A.11.5). Die gemessenen Geopositionen der Wegmarken können in diesem Modell als ECEF-Positionen verwendet werden. Alternativ kann der Streckenatlas-Server die Wegmarken als Punkte mit ECEF-Koordinaten auf der idealen Gleiskurve berechnen. Die geometrische Situation an einer Wegmarke ist in Abb. 81 dargestellt.

5.11.3.1 Sensor-Physikmodell

Jede Wegmarke hat eine dreidimensionale Geokoordinate im ECEF-Koordinatensystem. Die Position der Wegmarke soll sich auf der Gleiskurve (auf Schienenkopfhöhe) befinden. Die Koordinaten der Wegmarke mit den dazugehörigen Wegmarkendaten werden über eine MATLAB-Datenstruktur vor jeder Teilsimulation an das Simulink-Zentralmodell übergeben.

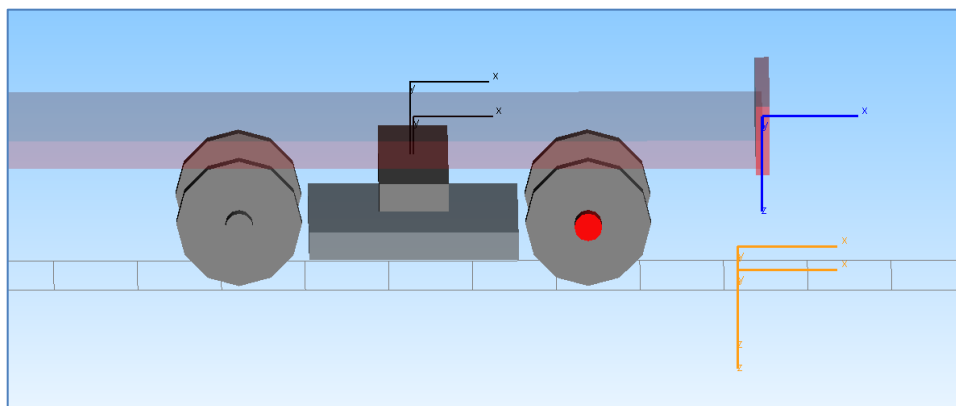


Abb. 61: Markerposition (gelb markierte Koordinatensysteme) der RFID-Antenne im 5-Körper-Modell (Abschnitt 5.8.2.2), SIMPACK 3D-Darstellung, oben: Antennenmarker, unten: Marker auf Schienenoberkante

In der Mehrkörpersimulation ist die Position der RFID-Antennen (Abb. 61) auf dem Schienenfahrzeug als Marker am Wagenkasten-Körper (als Koordinate im Wagenkasten-Koordinatensystem) definiert. Ein weiterer Marker beschreibt die horizontale Position der RFID-Antenne (weiterhin im Wagenkasten-Koordinatensystem) auf Höhe der Schienenoberkante.

Während der Simulation wird zu jedem Tastschritt der dreidimensionale Abstand zwischen dem Antennenmarker auf Schienenkopfhöhe und allen Wegmarkenpositionen berechnet. Die Wegmarke ist aktiv, wenn der Abstand zu einer Wegmarke kleiner ist als der definierte Empfangsradius einer Kugel um die Wegmarkenposition.

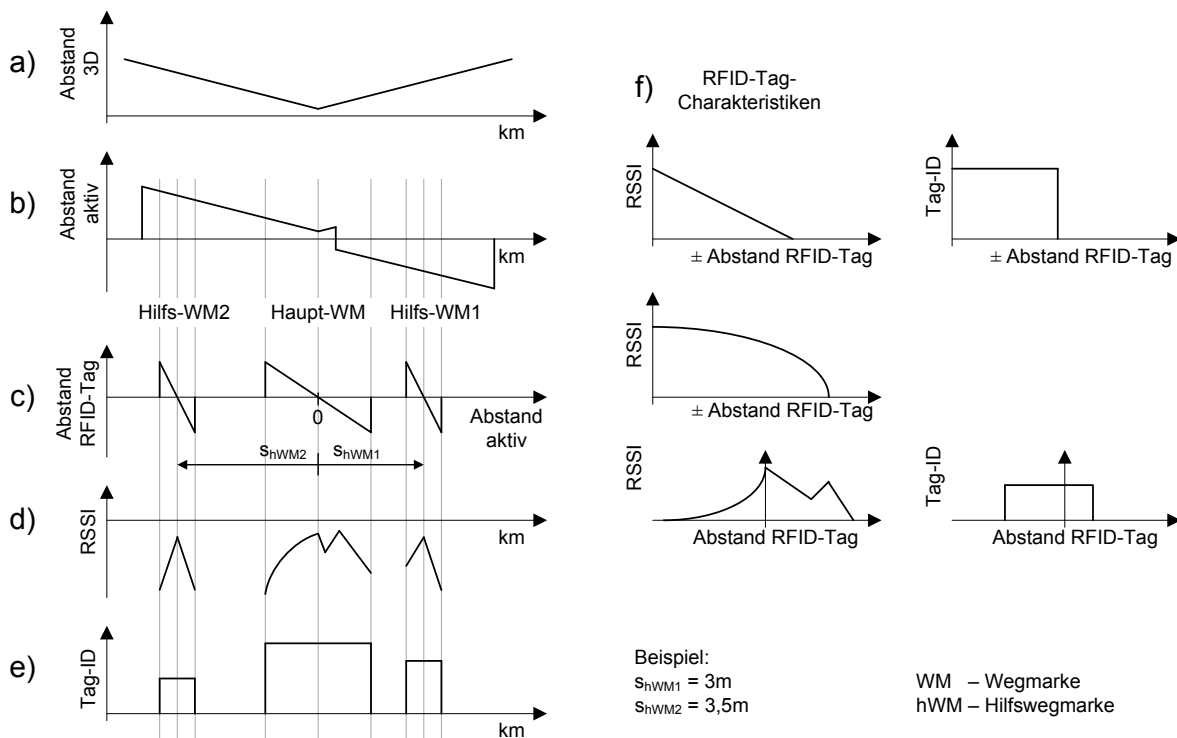


Abb. 62: Ableitung der RFID-Eigenschaften aus dem Abstand zur Wegmarke

In Abb. 62 sind die Eigenschaften des Modells innerhalb des Empfangsradius schematisch dargestellt. Das oberste Diagramm (Abb. 62a) zeigt den Verlauf der 3D-Abstandsmessung über der Distanz des Fahrweges als Kilometrierung. Auffälligerweise wird der 3D-Abstand zur Wegmarke nicht null, da sich die Marker durch verschiedene Störungen nicht exakt in einem Punkt begegnen. Als Kriterium, dass die RFID-Antenne den RFID-Transponder passiert hat, wird der minimale Abstand bestimmt. Dies wird robust erkannt, wenn der 3D-Abstand seit der Aktivierung der Wegmarke mindestens 0,1 Meter größer als der kleinste gemessene Abstand ist. Wird die Vorbeifahrt an der Wegmarke erkannt, dann wird das Abstandssignal für die weitere Berechnung invertiert. Es ergibt sich der Verlauf des aktiven Abstandes wie im zweiten Diagramm in Abb. 62b dargestellt.

Der zentrale RFID-Tag der Hauptwegmarke ist an der ECEF-Wegmarkenposition definiert. Zusätzlich wird die ECEF-Wegmarkenposition des zentralen RFID-Tags auf der Gleiskurve abgebildet. Vor und hinter dem zentralen RFID-Tag können sich RFID-Tags der Hilfswegmarken befinden. Die Hilfswegmarken sind durch einen Abstand s_{hWM} auf der Gleiskurve zur Hauptwegmarke definiert. Um jeden RFID-Transponder wird in Abb. 62c ein individueller Empfangsbereich mit einer lokalen Distanz zu seiner Wegmarke definiert. Wie der 3D-Abstand zur Hauptwegmarke in Abb. 62b haben auch die lokalen Distanzen der Wegmarken auf der Gleiskurve eine negative Steigung.

Als Funktion der lokalen Distanz können zu der RFID-Transponderauslesung weitere Eigenschaften generiert werden. In Abb. 62d werden, als ein Beispiel, mögliche Empfangsfeldstärken RSSI in Abhängigkeit von der lokalen Distanz zu einer Wegmarke dargestellt. Der Zusammenhang kann durch eine kontinuierliche Funktion oder als interpolierbare Tabelle vorgegeben werden. Liegt der 3D-Abstand außerhalb des Empfangsbereiches eines RFID-Transponders, so ist die lokale Distanz zu einer Wegmarke nicht definiert, und die Tag-ID hat den reservierten Wert null. Innerhalb der Empfangsbereiche eines RFID-Tags ist die Tag-ID (Abb. 62e) verfügbar. Ist die Tag-ID nicht null, dann wird aus der lokalen Distanz und der RSSI-Empfangscharakteristik (Abb. 62f) ein RSSI-Signal (Abb. 62d) erzeugt.

5.11.3.2 Physik-Störungsmodell

In diesem Störungsmodell werden verschiedene Effekte aufgezählt, die zu einer Veränderung der idealen Positionsmessung führen.

Das Wagenkasten-Koordinatensystem hat über den Drehgestell-Körper und die Radsätze nur einen indirekten Bezug zur Gleiskurve. Der Abstand ist durch Führungen und Sekundär- und Primärfedern nicht konstant. Der in diesem Modell berechnete Wegmarkenabstand bezieht sich auf den Abstand zwischen Antennenmarker auf Schienenkopfhöhe und Wegmarke. Dieser Abstand ist etwa genauso groß wie die relative Distanz auf der Gleiskurve, aber nur in Spezialfällen identisch. Bei einer Vorbeifahrt an einer Wegmarke wird der dreidimensionale Abstand minimal, jedoch nur in Spezialfällen ideal null. Die Spuren der RFID-Antennenmarker an einer Wegmarke sind in Abb. 81 exemplarisch dargestellt.

Durch eine versetzte Gleiskurve und das Spiel im Spurkanal wird sich das Schienenfahrzeug nicht ideal auf der Gleiskurve bewegen. Durch Nicken und Wanken des Wagenkastens kann sich die Position der RFID-Antenne auf Schienenkopfhöhe von der Gleiskurve entfernen.

Die Antennen befinden sich am Wagenkasten in einem gewissen Abstand vor den Drehgestelldrehachsen. Daher wird die Antennenposition bei einer Bogenfahrt im Vergleich zur Wegmarkenposition zum bogenäußeren versetzt.

Aufgrund von Messtoleranzen wird die vermessene Geoposition der Wegmarken sich nicht exakt auf der Gleisachse befinden.

5.11.3.3 Physik-Fehlermodell

Ist nicht implementiert.

5.11.3.4 Sensor-Technikmodell

Bei der einzelnen Auslesung eines RFID-Transponders werden folgende Werte bestimmt:

- ID, Tag-ID
- RSSI, Signalstärke
- Systemzeit

Die Tag-ID ist die Nummer der Wegmarke. Während einer Auslesung wird vom RFID-Lesegerät die empfangene Signalstärke (RSSI-Wert) des vom RFID-Tag ausgesendeten Signals gemessen. Während einer Überfahrt (Transponder/Tag im Empfangsbereich der Antenne) wird der Transponder so häufig wie technisch möglich ausgelesen. Aus den RSSI-Werten der Einzelmessungen ergibt sich abhängig von der Position des Schienenfahrzeuges auf dem Fahrweg eine charakteristische Intensitätskurve.

Nach einer erfolgreichen RFID-Transponderauslesung wird ein Zeitstempel mit der lokalen Systemzeit des RFID-Lesegerätes erstellt. Die Systemzeit des RFID-Lesegerätes ist auf die koordinierte Weltzeit (UTC) synchronisiert. Alternativ kann eine unsynchronisierte Systemzeit, beginnend bei einem beliebigen Wert, benutzt werden.

5.11.3.5 Technik-Störungsmodell

Die simulierte Elektronik zum Empfang des Dateninhaltes eines RFID-Transponders benötigt für die Detektion, Auslesung und Verarbeitung eine variable Verarbeitungszeit. Die Verarbeitungszeit ist mit einer Zykluszeit von 4 bis 8 Millisekunden modelliert. Die Auslesung des RFID-Transponders soll konstant 3 Millisekunden vor Ende des Zyklus (Weiterverarbeitung durch das Steuergerät) stattgefunden haben.

Die Daten des RFID-Lesegerätes werden bis zum Empfang der nächsten Botschaft konstant gehalten. Die Botschaften unterscheiden sich mindestens im Zeitstempel. Die empfangene Signalstärke des RFID-Transponders (RSSI-Wert) ist verrauscht.

5.11.3.6 Technik-Fehlermodell

Für die Eigenschaften ID, RSSI und Systemzeit innerhalb einer Botschaft wird das Fehlermodell nach Abschnitt 5.9.3 angewendet.

5.12 Fahrzeugfeste 3D-Sensorik

Als fahrzeugfeste dreidimensionale Sensorik werden Sensoren angesehen, die sich auf dem Schienenfahrzeug befinden und kontinuierlich eine dreidimensionale Position oder die Änderung einer dreidimensionalen Position oder Richtung messen. Auf dem IFS-Erprobungsträger befinden sich verschiedene Satellitennavigationssensoren (GNSS, Abb. 80), mit denen unterschiedlich genaue Geopositionen bestimmt werden können. Zudem sind mehrere Inertialsensoren (IMU) auf dem Schienenfahrzeug vorhanden.

Im folgenden Abschnitt 5.12.1 wird die Generierung von Geopositionen mit der Simulationsumgebung als funktionale Implementierung eines Satellitennavigationssensors vorgestellt. Anschließend beschreibt Abschnitt 5.12.2 die funktionale Modellierung eines integrierten Inertialsensors (IMU). Mit der funktionalen Simulation eines Satellitennavigationssystems aus GNSS-Weltraumsegment und GNSS-Benutzersegment werden in Abschnitt 5.13 die Rohdaten eines GNSS-Sensors generiert.

5.12.1 Satellitennavigation-Benutzersegment

Ein Satellitennavigationsempfänger (GNSS-Sensor) misst die Geoposition sowie den dreidimensionalen Geschwindigkeitsvektor und die Bewegungsrichtung des Phasenzentrums einer GNSS-Antenne.

Auf dem Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ befinden sich sechs Antennenpositionen von GNSS-Sensoren. Die Antennen sind am Fahrzeugaufbau befestigt, ihre Position ist im Wagenkasten-Koordinatensystem (Anhang A.10.1) definiert.

Abb. 63 zeigt die Marker als Eigenschaft des Wagenkastenkörpers im 5-Körper-Modell (siehe Abschnitt 5.8.2.2). Die Positionen sind in Anhang A.11.1 beschrieben.

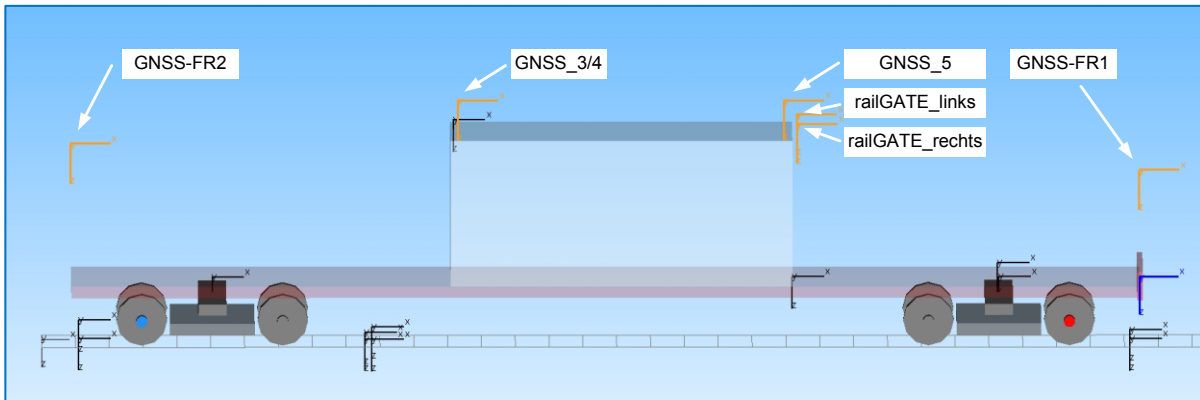


Abb. 63: SIMPACK Markerpositionen der GNSS-Antennen (gelb markierte Koordinatensysteme) im 5-Körper-Modell

5.12.1.1 Sensor-Physikmodell

Das Fahrzeugmodell der Mehrkörpersimulation (MKS) definiert die Antennenposition des GNSS-Sensors mit einem Marker im Wagenkasten-Koordinatensystem (KS-WK). Während der Simulation wird die absolute Position des Markers im MKS-Koordinatensystem I_{sys} bestimmt, über die Co-Simulationsschnittstelle an das Simulink-Zentralmodell übertragen und durch eine Koordinatentransformation in das ECEF-Koordinatensystem (Anhang D.2.5) umgerechnet. Der Geschwindigkeitsvektor des Markers im MKS-Koordinatensystem wird ebenfalls über die Co-Simulationsschnittstelle an das Simulink-Zentralmodell übertragen und durch eine Koordinatentransformation (Anhang D.2.5) in das ECEF-Koordinatensystem gedreht. Der Betrag des Geschwindigkeitsvektors bleibt dabei erhalten.

GNSS-Sensoren kennen systembedingt die Uhrzeit des GNSS-Systems und die UTC-Zeit. Der Sensor kann durch digitale Zeitpulse die später ausgegebenen Zeitpunkte (auf wenige Mikrosekunden) zeitrichtig ausgeben.

5.12.1.2 Physik-Störungsmodell

GNSS-Sensoren neigen zu zeitlich veränderlichen Positionsabweichungen, die üblicherweise als horizontale und vertikale Positionsstörung beschrieben werden. Niederfrequente Störungsdistanzen und höherfrequentes Rauschen werden in den drei Raumrichtungen des lokalen Koordinatensystems durch Signalgeneratoren separat erzeugt. Die Störungsdistanzen werden aus einem lokalen Koordinatensystem durch Koordinatentransformation in das ECEF-Koordinatensystem konvertiert und als Vektor auf den Positionsvektor aufaddiert.

5.12.1.3 Physik-Fehlermodell

Für die Eigenschaften Position, Geschwindigkeit und Systemzeit wird das Fehlermodell nach Abschnitt 5.9.3 angewendet.

5.12.1.4 Sensor-Technikmodell

GNSS-Sensoren haben digitale Schnittstellen, um Messdaten und alle weiteren verfügbaren Daten in verschiedenen Datenformaten auszugeben. Das verbreitetste Datenformat ist das „NMEA 0183“-Datenformat [64]. In dem hier behandelten Technikmodell werden die Datensätze RMC, GLL und GGA des NMEA-Datenformates erzeugt und die Signale der Datensätze in funktionaler Form in einem Simulink-Bus abgelegt. Alle Signale sind hier (abweichend vom NMEA-Datenformat) im Datentyp „double“ definiert. Buchstaben werden als Dezimalzahl des ASCII-Codes [113] übertragen. In einem zweiten Schritt werden ein Datenstring von 80 Byte Länge angelegt und die Signale als Daten im NMEA-Datenformat darin kodiert.

Jeder Datensatz bezieht sich auf einen exakten Zeitpunkt. Um den Datensätzen einem exakten Zeitpunkt zuordnen zu können, gibt der GNSS-Sensor einen Zeitpuls als ein einzelnes digitales Signal aus. Die steigende Flanke des Zeitpulses markiert den Beginn jeder Sekunde. Der Zeitpuls hat eine konfigurierbare Pulsdauer von 100 Millisekunden. Aus dem zeitlichen Zusammenhang des Zeitpulses und der anschließend eingelesenen NMEA-Datensätze kann das Alter der Datensätze bestimmt werden.

5.12.1.5 Technik-Störungsmodell

Zwischen dem definierten Zeitpunkt der Messung und der internen Bereitstellung des aktuellen Datensatzes liegt eine Verarbeitungszeit. Eine für jeden NMEA-Datensatz festgelegte Taktung aktualisiert die NMEA-Daten. Eine digitale Schnittstelle überträgt die Datensätze nur hintereinander mit einer definierten Bandbreite.

Die Datensätze des Simulink-Busses werden nach ihrer Taktung aktualisiert und anschließend um ihre Verarbeitungszeit und Übertragungszeit verzögert. Der Datenstring wird nach einer Taktung aktualisiert und um die Verarbeitungszeit verzögert. Die Bytes des Datenstrings werden entsprechend der Bandbreite des Übertragungsmediums und der Abtastzeit des Empfängerpuffers übertragen.

5.12.1.6 Technik-Fehlermodell

Die Signale des Simulink-Busses und des Datenstrings können nach dem Fehlermodell aus Abschnitt 5.9.3 verändert werden.

5.12.2 Inertial Measurement Unit (IMU)

Die Kombination von einem dreidimensionalen Beschleunigungssensor und eines dreidimensionalen Winkelgeschwindigkeitssensors wird als Inertial Measurement Unit (IMU) bezeichnet.

Mit eindimensionalen Beschleunigungssensoren lässt sich die Änderung der Geschwindigkeit (in der Ausrichtung des Beschleunigungssensors) bestimmen. Eindimensionale Drehratensensoren (Gyro) messen die Winkelgeschwindigkeit um eine Sensorachse.

Mit der Kombination von drei orthogonal zueinander ausgerichteten Beschleunigungssensoren ist die translatorische Bewegungsänderung eines Punktes in allen drei Raumrichtungen messbar. Drei orthogonal zueinander ausgerichtete Drehratensensoren können die Winkeländerung des Sensors um die drei Raumrichtungen messen.

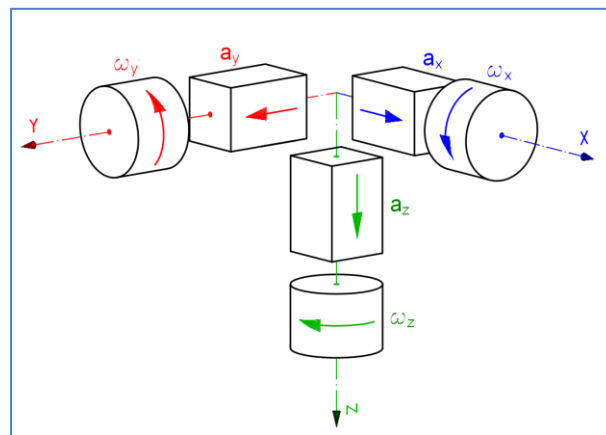


Abb. 64: Ausrichtung von drei IMU-Achsen mit Sensorelementen

In einem IMU-Sensor kann zusätzlich ein dreidimensionales Magnetometer eingebaut sein, das dreidimensional die Richtung des Erdmagnetfeldes misst.

Ein IMU-Sensor mit einer dreidimensionalen Beschleunigungs-, Drehraten- und Magnetfeldmessung (Abb. 64) ist im Folgenden modelliert. Die Ausrichtung des Sensorkoordinatensystems ist für die Berechnungen notwendig und wird ebenfalls bestimmt.

5.12.2.1 Sensor-Physikmodell

Im Mehrkörpersimulationsmodell ist ein Marker an die Position des IMU-Sensors im Wagenkasten-Koordinatensystem gesetzt (Anhang A.11.2). Die Ausrichtung des Marker-Koordinatensystems entspricht den Messachsen des IMU-Sensors. Von diesem Marker werden in der Mehrkörpersimulation die Beschleunigung, Drehrate und Winkellage in allen drei Raumrichtungen bestimmt und über die Co-Simulationschnittstelle an das Simulink-Zentralmodell übertragen. (In dem Beschleunigungssignal ist die Erdbeschleunigung nicht enthalten.)

Aus der Winkellage wird das dreidimensionale Magnetometersignal erzeugt. Die Winkellage hat einen absoluten Bezug zum MKS-Koordinatensystem. Aus der dreidimensionalen Winkellage wird ein normierter Vektor im MKS-Koordinatensystem erzeugt und durch Koordinatentransformation in das ECEF-Koordinatensystem und weiter in ein horizontal nach Norden (X-Achse) ausgerichtetes lokales NED-Koordinatensystem konvertiert (Nord-Richtung). Der Kompasswinkel ergibt sich aus dem (im Uhrzeigersinn von der Nordachse aus positiv definierten) Winkel zum Richtungsvektor des IMU-Sensors.

5.12.2.2 Physik-Störungsmodell

Die Erdbeschleunigung ist eine charakteristische Störung der drei Beschleunigungssensoren und wirkt als Erdbeschleunigungsvektor additiv auf den Bewegungs-Beschleunigungsvektor des Fahrzeuges. Der Betrag des Erdbeschleunigungsvektors wird mit $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ festgelegt. Die Richtung zeigt vertikal zum Erdmittelpunkt und wird in das IMU-Sensorkoordinatensystem transformiert.

Der Erdbeschleunigungsvektor wird aus dem ECEF-Positionsvektor gebildet. Hierbei wird die Richtung des ECEF-Positionsvektors invertiert und mit dem Betrag der Erdbeschleunigung versehen. Der ECEF-Erdbeschleunigungsvektor wird mit der ECEF-Winkellage des Sensor-Koordinatensystems in das Sensor-Koordinatensystem gedreht und auf den Sensor-Beschleunigungsvektor addiert.

Der IMU-Sensor kann im Wagenkasten-Koordinatensystem versetzt oder verdreht eingebaut sein. Hierfür versetzt bzw. verdreht man die Position und Ausrichtung des Markers im Mehrkörper-Simulationsmodell.

Die Richtung des Magnetometer-Vektors wird durch den Deklinations- und den Deviationswinkel in das Sensorkoordinatensystem dreidimensional gedreht.

Der Einfluss der Erddrehung auf das Winkelgeschwindigkeitssignal wird durch die Erdrotationsgeschwindigkeit und die Transportrate berücksichtigt.

Alle Sensorelemente werden durch ein zeitlich veränderlichen Offset, Drift, veränderliche Signalverstärkung und Messrauschen beeinflusst (siehe [23] S.61 ff).

5.12.2.3 Physik-Fehlermodell

Für jeden Messkanal können separat die möglichen Fehlereigenschaften nach Abschnitt 5.9.3 angewendet werden.

5.12.2.4 Sensor-Technikmodell

Es wird ein integrierter Sensor betrachtet, der die Messdaten intern aufbereitet und durch eine digitale Schnittstelle in SI-Einheiten ausgibt.

5.12.2.5 Technik-Störungsmodell

Alle Sensorelemente des IMU-Sensors können bei der Wandlung des physikalischen Signals in ein elektrisches Signal durch Pegelverschiebung (Offset) oder Änderung der Signalverstärkung (Gain) verändert werden. Diese Störungen sind niederfrequent veränderlich.

Alle Messkanäle sind durch ein kanalunabhängiges Rauschen gestört. Der Rauschpegel und die Rauschcharakteristik sind konfigurierbar.

Der Sensor sendet mit einer Taktrate von 100 Hz einen vollständigen Datensatz aus. Zwischen den Aktualisierungen werden die Messdaten konstant gehalten. Durch die digitale Datenübertragung ist der aktuelle Datensatz des Sensors um eine Verarbeitungs- und Übertragungszeit verzögert verfügbar.

5.12.2.6 Technik-Fehlermodell

Für jeden Messkanal kann separat die möglichen Fehlereigenschaften nach Abschnitt 5.9.3 angewendet werden.

5.13 Satellitennavigation-Simulation

Ausgehend von dem bereits in Abschnitt 5.12.1 eingeführten GNSS-Modell eines funktional modellierten GNSS-Empfängers auf Basis einer bekannten Antennenposition soll in diesem Modell die Rohdaten eines GNSS-Empfängers erzeugt werden.

Der grundsätzliche Aufbau eines Satellitennavigationssystems ist in Abschnitt 2.6 beschrieben. Das Modell enthält die funktionale Modellierung des Weltraumsegmentes mit der Positionsrechnung der Satelliten und des Nutzersegmentes in Form eines Empfängers. Als Rohdaten werden in diesem Modell die für die Berechnung einer Empfängerposition notwendigen Daten angesehen. Hierzu sind der wahre Abstand zwischen den Satelliten und der Empfängerantenne sowie die (in Realität messbaren) Pseudoabstände interessant.

Auf eine detaillierte Modellierung der Hochfrequenzeigenschaften des Satellitennavigationssystems wird bewusst verzichtet. Es wird davon ausgegangen, dass der Empfänger das Hochfrequenzsignal der GNSS-Satelliten empfängt, verarbeitet und die darin kodierten Daten und Zeitpunkte erfasst. Für die funktionale Modellierung eines GNSS-Sensors sind Generierung und Simulation des Hochfrequenzsignals nicht notwendig und würden auch zu weit von dem eigentlichen Fokus der Schienenfahrzeug-Simulationsumgebung weg führen.

Abschnitt 5.12.1 leitet die systematische Erzeugung der Antennenposition eines GNSS-Empfängers her. Mit der Definition der Bahnkurven in Abschnitt 2.6.2 werden

in Abschnitt 5.13.1 die Positionen des GNSS-Satelliten (GNSS-Weltraumsegment) berechnet. Aus der berechneten GNSS-Satellitenposition und der simulierten GNSS-Antennenposition auf dem Schienenfahrzeug wird in Abschnitt 5.13.2 der geometrische Abstand zu jedem Satelliten im ECEF-Koordinatensystem bestimmt. Dies ist (für jeden Satelliten einzeln) der wahre Abstand zwischen Satellit und Empfängerantenne (Truerange). Die für den Empfänger in einer modellierten Empfangssituation empfangbaren Satellitensignale werden in einem Störungsmodell (Abschnitte 5.13.3 und 5.13.4) zu den in der Realität messbaren Pseudoabständen (Pseudorange) weiterverarbeitet. In Abb. 65 ist die beschriebene Modellstruktur dargestellt.

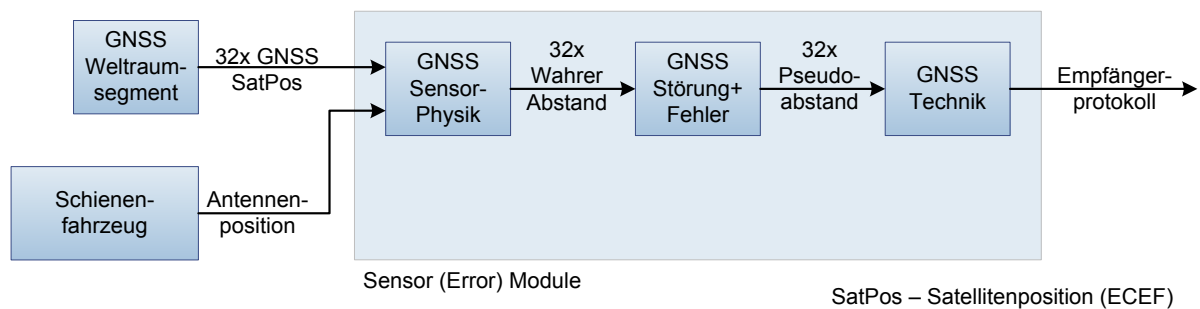


Abb. 65: Struktur des Satellitennavigationsmodells, schematischer Ausschnitt aus dem Simulink-Zentralmodell (Abb. 30)

Aus der Bahnbewegung des Satelliten und der Bewegung der Antenne des Schienenfahrzeuges lässt sich die Relativgeschwindigkeit zwischen den beiden Objekten bestimmen. Der wahren Relativgeschwindigkeit werden ebenfalls die modellierten Störungseinflüsse aufgeprägt und als Doppler-Geschwindigkeit bezeichnet. Die technische Schnittstelle eines GNSS-Sensors wird in Abschnitt 5.13.5 dargestellt. Auf die Implementierung dieses Sensormodells in MATLAB/Simulink wird in Abschnitt 5.13.7 eingegangen.

Das Sensormodell wird auf die terrestrische railGATE-Testumgebung als ein Sonderfall eines GNSS-Systems angewendet. Die Modellanpassungen sind in Abschnitt 5.13.6 beschrieben.

5.13.1 Berechnung der Satellitenposition

Die GNSS-Satelliten bewegen sich auf Satellitenbahnen (Orbit), die durch Bahnparameter beschrieben werden. Die bekannten Störungen der Satellitenbahn und der Satelliten- und Empfänger-Uhrenstörung werden bei der Berechnung der Satellitenposition durch Korrekturparameter berücksichtigt. Anschließend wird die im Submodell „GNSS Space Segment“ gekapselte Berechnung der Satellitenposition hergeleitet.

5.13.1.1 Zeitabweichung der Satellitenuhr

Satelliten nutzen hochgenaue und stabile Atomuhren. Über die lange Betriebsdauer der Satelliten wird jedoch auch die pro Zeiteinheit kleine Frequenzstörung der Atomuhren zu einer relevanten Abweichung von der GNSS-Zeit aufintegriert. Diese Zeitabweichung wird nicht direkt in der Uhrzeit des Satelliten korrigiert, sondern parallel zur Uhrzeit des Satelliten in Form von Korrekturparametern beschrieben. Die Korrekturparameter werden mit der Systemzeit des Satelliten ausgesendet, sodass der Empfänger den Sendezeitpunkt einer Botschaft in die GNSS-Uhrzeit umrechnen kann. Bei GPS werden drei Korrekturparameter $a_{f_}$ ausgegeben. Mit ihnen lässt sich die Zeitabweichung der Satellitenuhr Δt_{sv} aus der Referenzzeit der Ephemeriden t_{oc} und der Systemzeit des Satelliten zum Botschaftsanfang t_{sv} folgendermaßen bestimmen [22]:

$$\Delta t_{sv} = a_{f0} + a_{f1}(t_{sv} - t_{oc}) + a_{f2}(t_{sv} - t_{oc})^2 + \Delta t_r \quad (26)$$

Der Parameter Δt_r korrigiert relativistische Einflüsse aus der Exzentrizität der Satellitenbahn und ist folgendermaßen definiert:

$$\Delta t_r = F \cdot e \cdot \sqrt{A} \cdot \sin(E_k) \quad (27)$$

Die trotz Korrektur verbleibende Zeitabweichung des Satelliten wirkt sich bei der Laufzeitmessung auf alle Empfänger, die dieses Satellitensignal empfangen, gleich aus.

5.13.1.2 Zeitabweichung der Empfängeruhr

Die Systemuhr des Empfängers ist nicht so genau, dass eine auf absoluten Zeitstempeln basierende Laufzeitmessung zwischen Satellit und Empfänger zur Positionsbestimmung möglich ist. Die Zeitabweichung der Empfängeruhr erzeugt für alle Laufzeitmessungen von GNSS-Satelliten eine gleich große Zeitabweichung, die sich als Störungsabstand bei der Pseudoabstandsmessung auswirkt. Die Empfängeruhr wird auf die vom Weltraumsegment verwendete GNSS-Systemzeit mathematisch synchronisiert. Bei der Positionsschätzung werden die drei Empfängerkoordinaten als drei Unbekannte und die Zeitabweichung der GNSS-Empfängeruhrzeit von der GNSS-Systemzeit als vierte Unbekannte geschätzt.

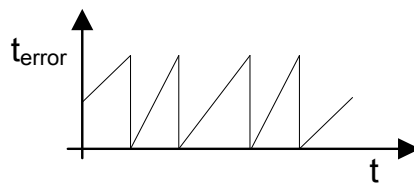


Abb. 66: Verlauf der Zeitabweichung der Empfängeruhr mit Zeitkorrektur

In dem hier beschriebenen Modell wird eine Empfängeruhrenabweichung vorgegeben. Auf dem Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ wird der GNSS-Empfänger Septentrio AsteRx3 HDC [114] eingesetzt. Bei dem Empfänger wird die Systemzeit (zur Bestimmung des Pseudoabstand) zyklisch korrigiert (Abb. 66), um die bei der GNSS-Positionsbestimmung geschätzte Zeitabweichung der Empfängeruhr auf einen charakteristischen Wertebereich zu beschränken. Dadurch wird die im Anschluss berechnete Korrekturzeit zwischen Empfängerzeit und GNSS-Zeit auf einen für den Empfänger charakteristischen Wertebereich beschränkt.

5.13.1.3 Berechnung der GNSS-Satellitenposition im ECEF-Koordinatensystem

Zu jedem Zeitpunkt lässt sich die aktuelle Position eines GNSS-Satelliten auf seiner Umlaufbahn bestimmen. Dieser Abschnitt beschreibt die verwendete Berechnung der Satellitenposition nach Farrell [22]. Der nun folgende Berechnungsweg und alle Formeln sind aus Farrell [22, S. 491] entnommen.

Die Einheit [*semi-circle*] bezieht einen Halbkreis auf den Wert eins ($\pi \text{ rad} = 180^\circ = 1 \text{ semi-circle}$). Der in diesem Abschnitt verwendete Index k bezieht sich auf einen Iterationsprozess zur Positionslösung aus Farrell [22, S.269ff], der hier nicht verwendet wird. Der Index wird jedoch zur durchgängigen Variablenbezeichnung mitgeführt. Die im Folgenden verwendeten Symbole der Bahnparameter sind in Kapitel 9.2 beschrieben.

Der vom Satelliten angegebene Sendezeitpunkt t_{sv} wird um die in Abschnitt 5.13.1.1 beschriebenen Zeitabweichung der Satellitenuhr korrigiert.

$$t = t_{sv} - \Delta t_{sv} \text{ [s]} \quad (28)$$

Länge der kleinen Achse der Ellipse, A

$$A = (\sqrt{A})^2 \text{ [m]} \quad (29)$$

Kompensierte mittlere Bewegung, n_0

$$n_0 = \sqrt{\frac{\mu}{A^3}} \text{ [rps]} \quad (30)$$

Zeit seit Beginn der Referenzepoche, t_k

$$t_k = t - t_{oe} \text{ [s]} \quad (31)$$

Korrektur der mittleren Bewegung, n

$$n = n_0 + \Delta n \text{ [rps]} \quad (32)$$

Mittlere Anomalie, M_k

$$M_k = M_0 + t_k \cdot n \text{ [rad]} \quad (33)$$

Kepler-Gleichung der exzentrischen Anomalie, E_k (Achtung: Rückkopplung)

$$E_k = M_k + e \cdot \sin(E_k) \text{ [rad]} \quad (34)$$

Wahre Anomalie, v_k (berechnet mit 4-Quadranten-Arkustangens)

$$v_k = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{1-e^2} \cdot \sin(E_k)}{1-e \cdot \cos(E_k)}, \frac{\cos(E_k) - e}{1-e \cdot \cos(E_k)} \right) \text{ [rad]} \quad (35)$$

Breitengrad, φ_k

$$\varphi_k = v_k + \omega \text{ [rad]} \quad (36)$$

In der Satellitennavigation wird die Bahnkurve durch weitere Korrekturparameter beschrieben, die die Bahnbewegung und Bahnstörung beschreiben. Die Parameter C_{uc} , C_{us} , C_{rc} , C_{rs} , C_{ic} , C_{is} beschreiben sinusförmige Abweichungen während eines Bahn-umlaufes. Deren Wirkrichtung ist in Abb. 67 dargestellt. Daraus werden drei Korrekturterme für den Längengrad, den Radius und die Inklination berechnet [22]. Die Zeit-Ableitungen der Inklination (IDOT) und der Winkel des aufsteigenden Knotens (OMEGA_DOT) beschreiben die Bewegungsänderung der Bahnkurve.

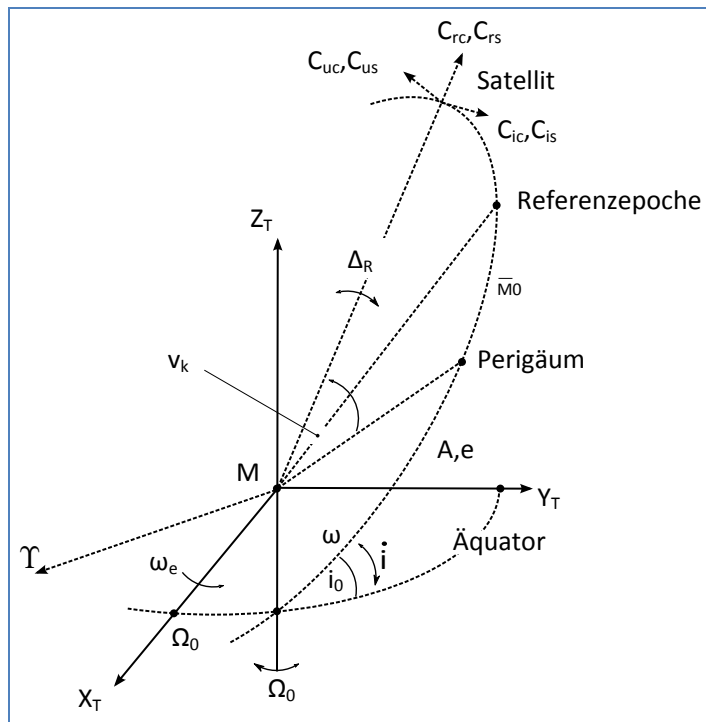


Abb. 67: Grafische Beschreibung der Satellitenbahn mit Korrekturparametern [25]

Breitengrad-Korrektur, δu_k

$$\delta u_k = C_{us} \cdot \sin(2\varphi_k) + C_{uc} \cdot \cos(2\varphi_k) \quad [rad] \quad (37)$$

Orbitradius-Korrektur, δr_k

$$\delta r_k = C_{rs} \cdot \sin(2\varphi_k) + C_{rc} \cdot \cos(2\varphi_k) \quad [m] \quad (38)$$

Inklination-Korrektur, δi_k

$$\delta i_k = C_{is} \cdot \sin(2\varphi_k) + C_{ic} \cdot \cos(2\varphi_k) \quad [rad] \quad (39)$$

Breitengrad korrigiert, u_k

$$u_k = \varphi_k + \delta u_k \quad [rad] \quad (40)$$

Orbitradius korrigiert, r_k

$$r_k = A \cdot (1 - e \cdot \cos(E_k)) + \delta r_k \quad [m] \quad (41)$$

Inklination korrigiert, i_k

$$i_k = i_0 + \delta i_k + (IDOT) \cdot t_k \quad [rad] \quad (42)$$

X-Position in der Orbitalebene, X_k

$$X_k = r_k \cdot \cos(u_k) \quad [m] \quad (43)$$

Y-Position in der Orbitalebene, Y_k

$$Y_k = r_k \cdot \sin(u_k) \quad [m] \quad (44)$$

Korrigierter Längengrad Ω_k des aufsteigenden Knotens Υ

$$\Omega_k = \Omega_0 + (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}_e) \cdot t_k - \dot{\Omega}_e \cdot t_{oe} \quad [rad] \quad (45)$$

X-Koordinate des Satelliten im ECEF-Koordinatensystem, x_k

$$x_k = X_k \cdot \cos(\Omega_k) - Y_k \cdot \cos(i_k) \cdot \sin(\Omega_k) \quad [m] \quad (46)$$

Y-Koordinate des Satelliten im ECEF-Koordinatensystem, y_k

$$y_k = X_k \cdot \sin(\Omega_k) - Y_k \cdot \cos(i_k) \cdot \cos(\Omega_k) \quad [m] \quad (47)$$

Z-Koordinate des Satelliten im ECEF-Koordinatensystem, z_k

$$z_k = Y_k \cdot \sin(i_k) \quad [m] \quad (48)$$

Vektorschreibweise der Position des Satelliten im ECEF-Koordinatensystem zum Sendezeitpunkt des Satelliten:

$$[P]^{t_{sv}} = \begin{pmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{pmatrix} \quad (49)$$

Die Positionsberechnung der Satelliten wird für alle bekannten Satelliten zu jedem Zeitschritt, in dem eine GNSS-Position berechnet werden soll, durchgeführt.

5.13.2 Berechnung des wahren Abstandes (Truerange) des GNSS-Empfängers zu den GNSS-Satelliten (Sensor-Physikmodell)

Bevor der wahre Abstand zwischen GNSS-Satellit und GNSS-Empfänger berechnet werden kann, muss die Signallaufzeit (zwischen GNSS-Satellit und GNSS-Empfänger) wegen der Erddrehung korrigiert werden.

5.13.2.1 Erddrehung während der Signallaufzeit (Sensor-Physikmodell)

In den bisherigen Gleichungen wurde angenommen, dass die Pseudoabstandsmessung zwischen Satellit und Empfänger in einer vernachlässigbaren Zeit stattfindet. Technisch wird die Abstandsmessung durch eine Signallaufzeitmessung durchgeführt.

Das ECEF-Koordinatensystem ist ein erdfestes Koordinatensystem, das kontinuierlich mit der Erde rotiert. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle ist nur gegenüber einem feststehenden Koordinatensystem konstant. Das ECEF-Koordinatensystem hat sich während der Signallaufzeit gegenüber einem feststehenden Koordinatensystem jedoch um die Erdachse gedreht, und somit sind die zwei ECEF-Koordinatensysteme am Sendezeitpunkt t_{sv} und Empfangszeitpunkt t_r nicht gleich. Die Zeitbasis ist jedoch gleich.

Um die Koordinaten der zwei ECEF-Koordinatensysteme zu den zwei Zeitpunkten verwenden zu können, müssen die Koordinatensysteme durch Drehung um die Erdrotationsachse (ECEF Z-Achse) auf einen Zeitpunkt bezogen werden [22, Appendix C.3]. Die Rotationsgeschwindigkeit der Erde ω_{ie}^e (im inertialen Koordinatensystem der Erde) und die Signallaufzeit sind bekannt, und daraus kann der Rotationswinkel der Erde berechnet werden:

$$\varphi_e = (t_r - t_{sv}) \cdot \omega_{ie}^e \quad [rad] \quad (50)$$

Über eine Rotationsmatrix $R_{e(t_{sv})}^{e(t_r)}$ wird dann die ECEF-Position des Satelliten zum Sendezeitpunkt $p_{sv}^{e(t_{sv})}$ um den Rotationswinkel φ_e um die Erdachse in das ECEF-Koordinatensystem zum Empfangszeitpunkt gedreht:

$$R_{e(t_{sv})}^{e(t_r)} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_e) & \sin(\varphi_e) & 0 \\ -\sin(\varphi_e) & \cos(\varphi_e) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (51)$$

$$p_{sv}^e = p_{sv}^{e(t_r)} = [P]^{t_r} = R_{e(t_{sv})}^{e(t_r)} p_{sv}^{e(t_{sv})} \quad (52)$$

5.13.2.2 Berechnung des wahren Abstandes (Truerange)

Als wahrer Abstand wird hier der geometrische Abstand zwischen Satellit und Empfänger verstanden. Aus der Empfängerposition p_r^e und der Satellitenposition $p_{sv(i)}^{e(t_r)}$ (des i-ten Satelliten) kann der geometrische Abstand zwischen den Objekten als wahrer Abstand berechnet werden [22, S. 267].

$$R_i(p_r^e, p_{sv(i)}^e) = |p_r^e - p_{sv(i)}^e| \quad (53)$$

Die Empfängerposition $p_r^{e(t_r)}$ und die Satellitenpositionen $p_{sv}^{e(t_r)}$ nach Abschnitt 5.13.2.1 beziehen sich auf das ECEF-Koordinatensystem zum Empfangszeitpunkt t_r der Botschaft. Aus dieser Berechnung ergibt sich der physikalisch richtige geometrische Abstand (Truerange) zwischen Satellit und Empfängerantenne.

5.13.3 Störungseinflüsse der Pseudoabstandsmessung (Physik-Störungsmodell)

Der wahre Abstand zwischen Empfänger und Satellit (Truerange) wird durch systematische und stochastische Störungen verändert. Die nachfolgenden Abschnitte beschreiben die Störungen. Aus dem wahren Abstand und den Störungen wird anschließend der Pseudoabstand berechnet.

5.13.3.1 Distanz aus der Zeitabweichung der Satellitenuhr

Die Pseudoabstandsmessung bezieht sich auf den Empfangszeitpunkt des Empfängers und den Sendezeitpunkt am Satelliten. Es wird definiert, dass die Empfänger-Uhrzeit auf die Uhrzeit des GNSS-Systems synchronisiert ist. Der Sendezeitpunkt des i-ten Satelliten bezieht sich auf die Zeitbasis des Satelliten, die sich von der Zeitbasis des GNSS-System unterscheidet. Die schon in Abschnitt 5.13.1.1 eingeführte Zeit-

abweichung $\Delta t_{sv(i)}$ der Satellitenuhr führt bei der Pseudoabstandsmessung zu einer Längenmessabweichung:

$$s_{\Delta t_{sv,i}} = \Delta t_{sv(i)} \cdot c \quad (54)$$

5.13.3.2 Atmosphärische Störungen

Bisher wurde bei der Bestimmung des Pseudoabstands durch eine Signallaufzeitmessung davon ausgegangen, dass sich das Signal vollständig durch ein ideales Vakuum bewegt. Daher wurde für die Bestimmung des Pseudoabstands aus der gemessenen Signallaufzeit die Vakuumlichtgeschwindigkeit c verwendet. Einen Teil des Weges wird das GNSS-Signal jedoch durch die Atmosphäre zurücklegen. Auf dieser Teilstrecke hat die elektromagnetische Strahlung des GNSS-Signals eine geringere Ausbreitungsgeschwindigkeit als die Vakuumlichtgeschwindigkeit. Daraus ergibt sich eine verlängerte Signallaufzeit zwischen Satellit und Empfänger. Durch den Brechungseffekt an unterschiedlich dichten Medien wird das Signal abgelenkt und der Signalweg verlängert.

Auf die Implementierung von Atmosphärenmodellen wurde in dieser Arbeit verzichtet. Es wird auf das im nachfolgenden Abschnitt 5.13.3.3 beschriebene allgemeine Störungsmodell sowie auf die Fachliteratur [22, 24] verwiesen.

5.13.3.3 Allgemeines Störungs- und Fehlermodell

Die Pseudoabstandsmessungen sind durch physikalische und technische Effekte gestört. Folgende Störungen werden in der Literatur [24] als systematische oder stochastische Störungen aufgeführt, die zu einer ungewollten und nicht kompensierten Veränderung der Pseudoabstandsmessung führen:

- Ungenaue Ephemeridendaten
- Unvollständige Kompensierung der Satellitenuhr
- Atmosphärische Störungen in der Ionosphäre und Troposphäre
- Mehrwegeausbreitung
- Allgemeine Störungen der Empfängermessung

Charakteristische Störungen des Pseudoabstandes an bestimmten Positionen können durch örtliche Begebenheiten ausgelöst werden. So können Satelliten durch Hindernisse verdeckt sein. Bei Bahnhofseinfahrten oder Tunnelfahrten wird der Sichtbereich auf die Satelliten teilweise oder vollständig verdeckt. Dies wird in diesem Fehlermodell durch positionsabhängige Löschung der Pseudoabstandsmessung von Satelliten umgesetzt. Der Sichtbereich der GNSS-Antenne auf die Satelliten lässt sich durch einen Skyplot (siehe Anhang D.2.9) beschreiben. Bereiche oberhalb des künstlichen

Horizontes (potenziell am Himmel sichtbar) lassen sich durch positive Elevationswinkel des Skyplots beschreiben.

In diesem Modell werden die Störungen auf die Pseudoabstandsmessung zu den einzelnen Satelliten durch einen zusammengefassten Störungsabstand beschrieben. Die Charakteristik des Störungsabstandes zu jedem Satelliten ist an der in Abb. 73 dargestellten Schnittstelle variabel. In der aktuellen Implementierung werden ein niederfrequenter Abstand und ein hochfrequentes Rauschen als Störabstand erzeugt. Damit ergibt sich eine Störungscharakteristik für die daraus berechnete Position wie in Abschnitt 5.12.1.2 beschrieben.

Analog zu dem in Abschnitt 5.9.3 beschriebenen Fehlermodell für Sensoren können dem Signal für jede Pseudoabstandsmessung zu Satelliten auch verallgemeinerte Störungen oder Fehler aufgeprägt werden.

Das Modell erzeugt für die Pseudoabstandsmessung zu jedem Satelliten eine additiv wirkende Distanzstörung $s_{allg,sv(i)}$ und einen multiplikativ wirkenden Faktor $x_{Fehler,sv(i)}$.

5.13.4 Berechnung des Pseudoabstands (Physik-Störungsmodell)

Der Pseudoabstandmesswert des Empfängers enthält den wahren Abstand zwischen Satellit und Empfänger (wahrer Abstand $R_i(p_r^e, p_{sv(i)}^e)$) sowie systematische und stochastische Störungen, wie in den vorangegangenen Abschnitten 5.13.3 beschrieben. Ein Auswertalgorithmus zur Verarbeitung von Pseudoabstandsdaten erwartet, dass die GNSS-Messung charakteristisch verändert ist. Aus den oben schon beschriebenen Störungen ist das Pseudoabstandssignal $\tilde{\rho}(p_r, p_{sv}^i)$ nun synthetisch aus dem wahren Abstand $R(p_r, p_{sv}^i)$ mit Erdrotationsabweichung Δs_{RotE} , einer satellitenabhängigen Laufzeitabweichung $\Delta t_{sv(i)}$, einer empfängerseitigen Laufzeitabweichung Δt_r und einer verallgemeinerten Distanzabweichung $s_{allg,sv(i)}$ zu berechnen:

$$\tilde{\rho}_i(p_r, p_{sv}^i) = R_i(p_r^e, p_{sv(i)}^e) + (\Delta t_{sv(i)} + \Delta t_r) \cdot c + s_{allg,sv(i)} \quad (55)$$

Daraus ergibt sich die in Abb. 68 dargestellte grafische Beschreibung im Zeitbereich. Die daraus interpretierbaren Distanzen ergeben sich durch die Multiplikation mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit. Die Berechnung wird in diesem Modell für jeden bekannten Satelliten durchgeführt. Der Index i bezeichnet die PRN-Nummer des Satelliten.

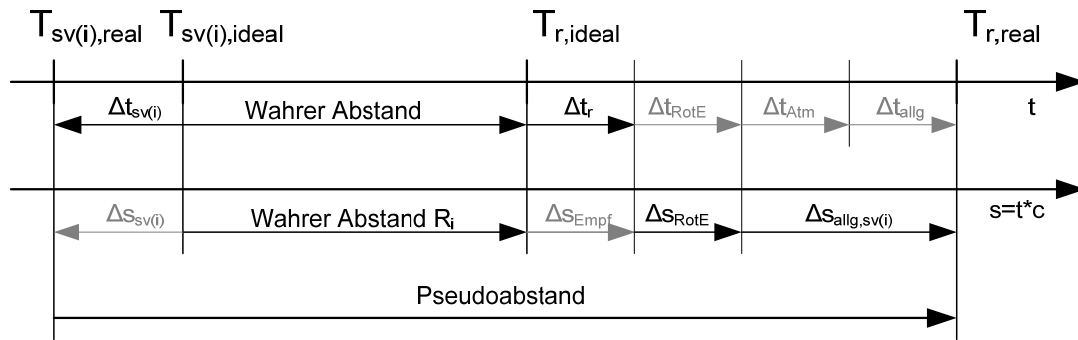


Abb. 68: Grafische Interpretation der Pseudoabstandsrechnung

5.13.5 Sensor-Technikmodell und Technik-Störungsmodell

Pseudoabstandsmessungen werden in einer konfigurierten Taktung relativ zur UTC-Zeit durchgeführt. Zwischen den Takten werden die virtuellen Messdaten konstant gehalten.

Die vorhandenen Daten werden protokollbasiert an digitalen Schnittstellen ausgegeben. Der auf dem IFS-Erprobungsträger eingesetzte GNSS-4 Sensor gibt seine Rohdaten im Septentrio-Herstellerprotokoll SBF [65] in der Botschaft 4027 „MeasEpoch“ an. Das Datenformat der Botschaft ist als Simulink-Bus implementiert und wird zyklisch aktualisiert.

Die GNSS-Satelliten senden die für diese Epoche vorausberechneten Bahndaten kontinuierlich aus. Die in der Botschaft 5891 „GPSNav“ für jeden Satelliten einzeln übertragenen Bahndaten (Ephemeriden) werden dem Modell zu Beginn der Simulation als zusammengefasster Datensatz „GPSNavTable“ zur Verfügung gestellt (Abb. 69).

5.13.6 Galileo-Testumgebung „railGATE“ in Wegberg-Wildenrath

Als Erweiterung des konventionellen Satellitennavigationsmodells wird die Ortung im railGATE (Abschnitt 3.3.3) funktional nachgebildet.

Die acht Pseudo-Satellitensender (Pseudoliten) werden als feststehende Satelliten mit einer fixen ECEF-Position angesehen. Dies vereinfacht die Berechnung der Satellitenposition und Satellitengeschwindigkeit aus den Bahnparametern auf die feste Vorgabe einer ECEF-Position pro Pseudoliten. Die Positionen der Pseudolitenantennen sind in Anhang B.6 dokumentiert.

Die weitere Positionsbestimmung erfolgt analog zur konventionellen Satellitennavigation. Der Einfluss von atmosphärischen Störungen ist geringer. Jedoch ist durch die geringen Elevationswinkel der Einfluss von Mehrwegeausbreitung und Abschattungen größer.

5.13.7 Implementierungsstruktur

Die in diesem Abschnitt 5.13 beschriebenen Algorithmen werden im Simulink-Zentralmodell als Simulink-Subsysteme implementiert. Dabei wurde kein eingebetteter MATLAB-Code in Simulink verwendet, um einen Medienbruch zwischen der grafischen Darstellungsweise von Simulink und der textuellen Beschreibungsweise von MATLAB zu vermeiden. Diese durchgängige Implementierung erhöht die Les- und Wartbarkeit der Software.

Innerhalb der Simulationsumgebung wird bevorzugt mit dem Datentyp „double“ gerechnet, sodass die in den Rohdatenformaten vorliegenden Signale konvertiert werden. In der Simulationsumgebung wird (bis auf wenige Ausnahmen innerhalb von Subsystemen, die besonders gekennzeichnet werden) ausschließlich mit SI-Einheiten gearbeitet. Alle Schnittstellen umfassen die Konvertierung zu SI-Einheiten.

5.13.7.1 Positionsberechnung der GNSS-Satelliten

Die Ephemeridendaten können aus verschiedenen Datenquellen stammen und in das „GPSNavTable“-Format konvertiert werden. Die sogenannten „Broadcast Ephemeriden“ sind im RINEX-Dateiformat von Internetservern erhältlich (siehe Anhang B.8). Die genaueren finalen Ephemeriden „Final Ephemeris“ sind im TLE-Format verfügbar (siehe Anhang B.10). Die Konstellation des Galileo-Satellitennavigationssystems wurde aus dem Programm „GALILEO System Simulation Facility“ (GSSF) importiert.

Die Variable „GPSNavTable“ kann zur Rekonstruktion von Messfahrten des IFS-Erprobungsträgers von der automatisierten Messdatenauswertung erzeugt werden und enthält dann die während der Messfahrt empfangenen Ephemeridendaten, die von den Satelliten ausgesendet wurden.

In Abb. 69 ist das Subsystem zur Erzeugung der ECEF-Positionen und ECEF-Geschwindigkeitsvektoren der GNSS-Satelliten dargestellt. Die Variable „GPSNavTable“ umfasst alle Bahnparameter aller GNSS-Satelliten. Die Datenstruktur besteht aus einem Simulink-Bus, in dem die Bahnparameter als Arrays angelegt sind. In jedem Array sind die Parameter von bis zu 36 Satelliten enthalten. Die PRN-Nummer des Satelliten wird als Index des Arrays verwendet. Am Signalfluss ist zu erkennen, dass die Position der Satelliten ausschließlich durch die Ephemeriden und den Zeitpunkt TOW (siehe Abschnitt 2.6.3) bestimmt werden.

Das „For Each“-Subsystem „Sat_Position1“ weist die Besonderheit auf, dass der darin enthaltene Simulink-Code für jeden Eintrag der am Eingang verbundenen Arrays ausgeführt wird. Somit wird die Positionsberechnung als Template für einen Satelliten implementiert, und das Subsystem führt den Algorithmus für alle in den Arrays

vorhandenen Satelliten aus. Die berechnete ECEF-Position aller Satelliten wird ebenfalls als Array ausgegeben.

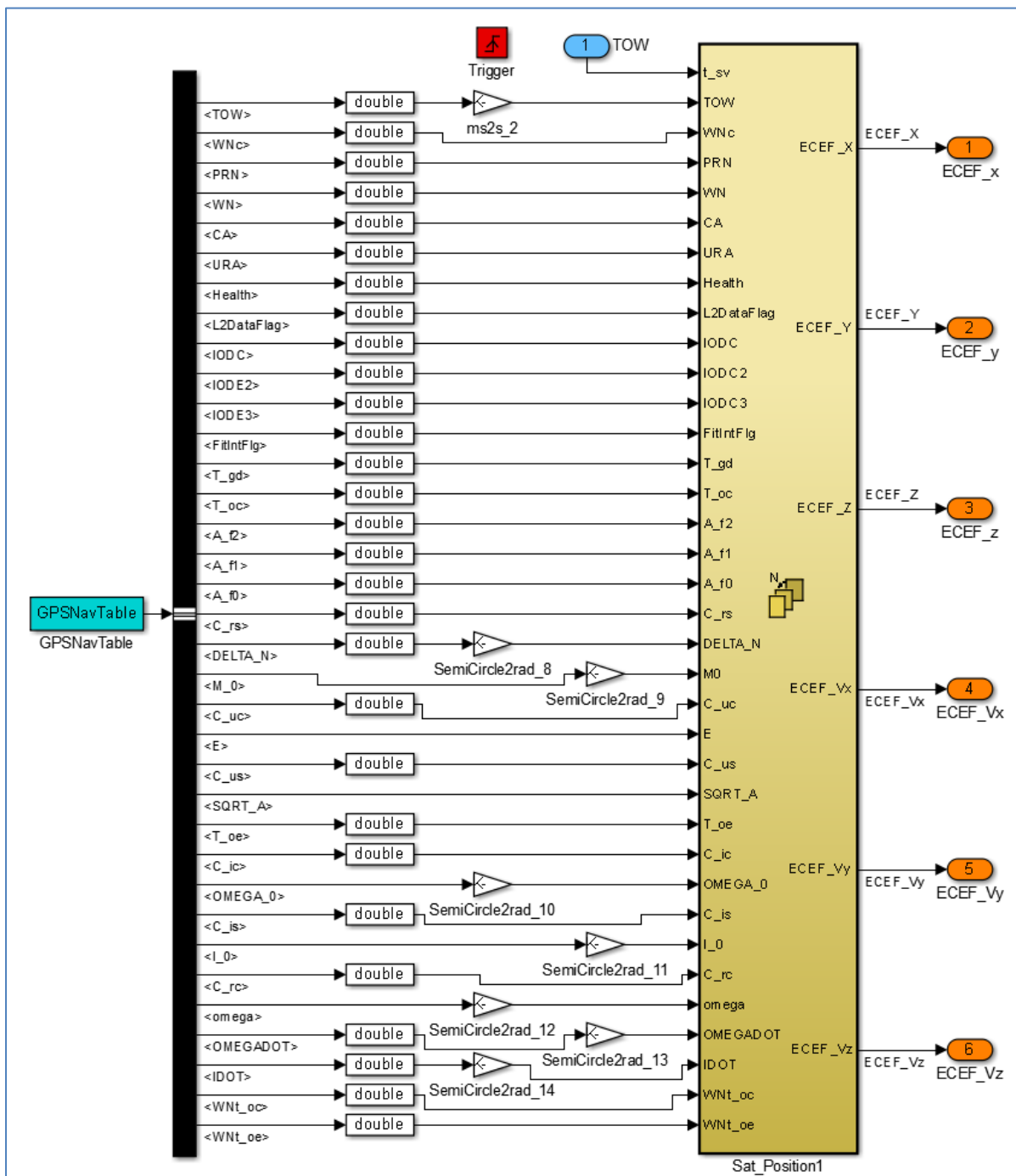


Abb. 69: Simulink-Subsystem zur Berechnung von Satellitenposition und Satellitengeschwindigkeit im ECEF-Koordinatensystem

Der GNSS-Sensor berechnet zu jeder vollen Zehntel-Sekunde (UTC-Zeit) einen vollständigen Messdatensatz. Dies entspricht der Abtastfrequenz des GNSS-4 Sensors von 10Hz. Die Subsysteme der Satellitennavigation werden durch einen Trigger nur zu diesen Zeitpunkten einmal ausgeführt.

5.13.7.2 Abstandsberechnung zwischen GNSS-Empfänger und GNSS-Satelliten

Abb. 70 zeigt die Subsysteme im Sensor-Fehler-Modul, in dem die weiteren Berechnungsschritte für den wahren Abstand (Truerange), für den Pseudoabstand (Pseudorange) und für die Software-Schnittstelle des GNSS-4 Empfängers (MeasEpoch_Bus) enthalten sind.

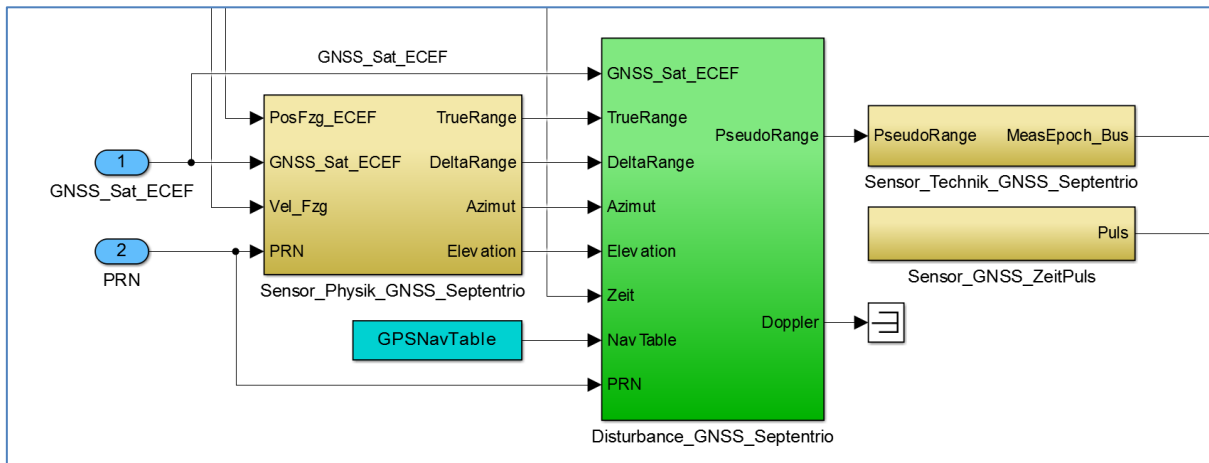


Abb. 70: Ausschnitt des Sensor-Fehler-Moduls, Subsysteme der Satellitennavigation

In Abb. 30 ist bereits auf der obersten Ebene des Simulink-Zentralmodells das Subsystem „GNSS Space Segment“ angeordnet, in dem die aktuellen Satellitenpositionen berechnet werden. Zur Bestimmung des wahren Abstandes (Truerange) werden im Subsystem „Sat_visible“ (Abb. 71) die Satelliten selektiert, die von der Antenne des GNSS-Empfängers aus sichtbar sind. Das Kriterium der Sichtbarkeit des Satelliten gilt in dieser Implementierung als erfüllt, wenn die Position des Satelliten oberhalb des künstlichen Horizontes (Elevationswinkel $> 0^\circ$, Anhang D.2.9) liegt. Die Definition eines größeren Elevationswinkels erzeugt einen nach oben (zur Vertikalen) offenen Sichtbarkeitskegel. Nur die sichtbaren Satelliten werden für die weitere Berechnung des wahren Abstandes verwendet. Der wahre Abstand wird in dem „For Each“-Subsystem „TrueRange_Calc“ mit einer Simulink-Implementierung des in Abschnitt 5.13.1.3 beschriebenen Algorithmus für jeden sichtbaren Satelliten berechnet.

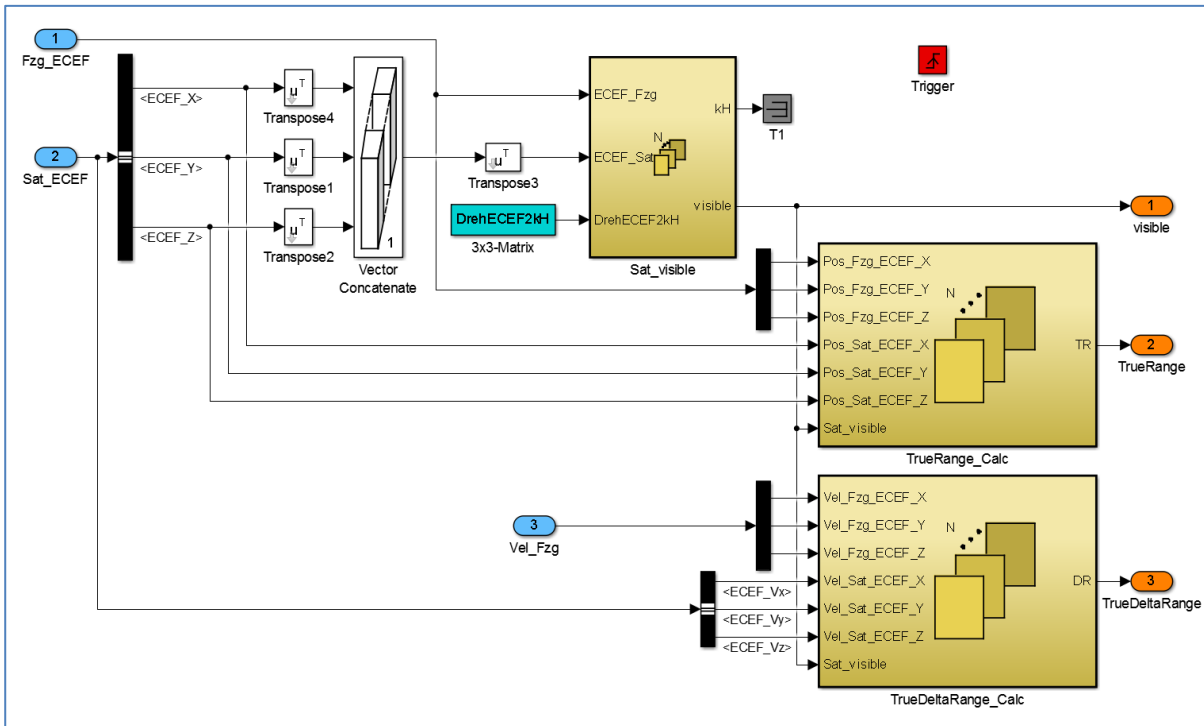


Abb. 71: Simulink-Subsystem zur Berechnung des wahren Abstandes der sichtbaren Satelliten

In Abb. 72 wird die aus der bekannten Zeitabweichung des Satelliten resultierende Distanzabweichung des Pseudoabstandes nach Abschnitt 5.13.1.1 berechnet.

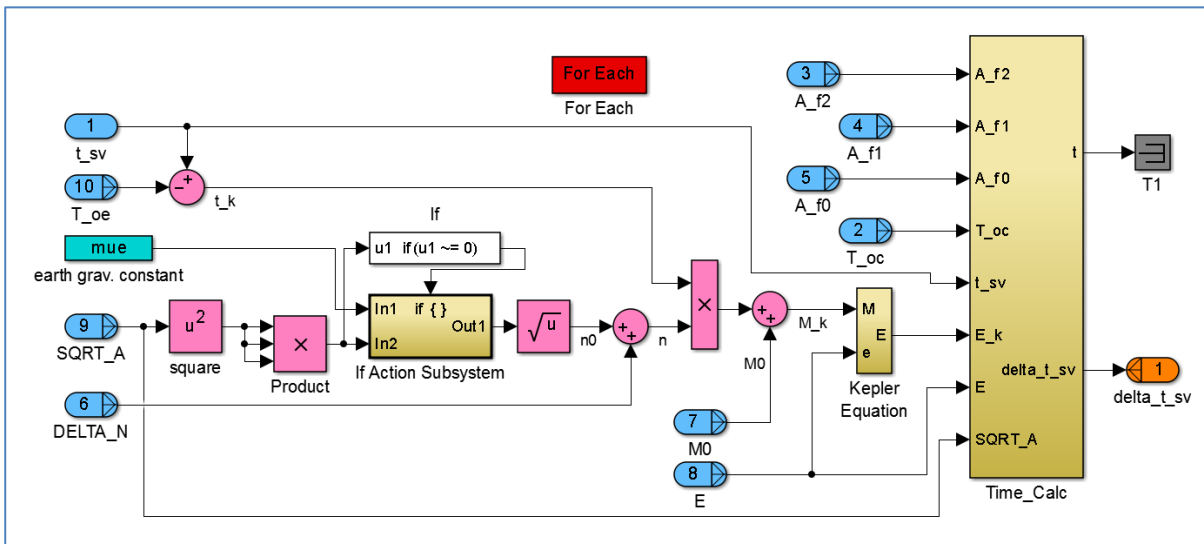


Abb. 72: Berechnung des satellitenindividuellen Zeitversatzes der Pseudoabstands-Laufzeitmessung, Subsystem „calc_delta_t_sv“ in Abb. 73

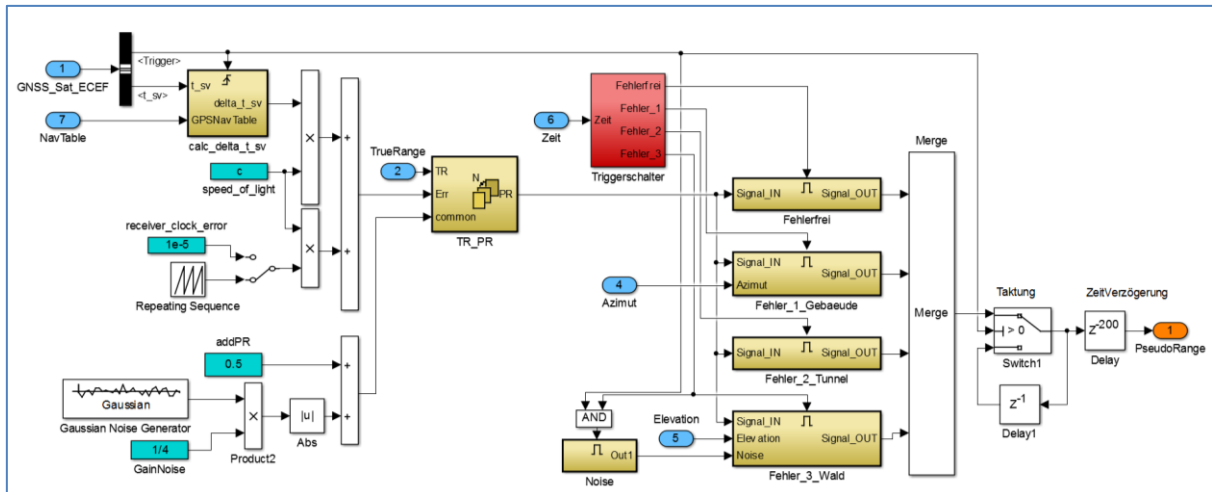


Abb. 73: Berechnung des Pseudoabstands mit Fehlermodell

Der Pseudoabstand wird in Abb. 73 aus dem wahren Abstand und den systematischen und stochastischen Störungen gebildet.

5.14 Implementierte Streckendefinitionen

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Gleisanlagen des Institut für Schienenfahrzeuge und Fördertechnik (IFS) der Universität RWTH Aachen und des Prüf- und Validation-center in Wildenrath mit der MATLAB-Software „SimU-Streckengenerator“ nach der in Abschnitt 4.7 vorgestellten Methodik erstellt. Für allgemeine Untersuchungen mit dieser Simulationsumgebung wurden generische Streckenmodelle erstellt.

5.14.1 Anschlussgleise im Bahnhof Aachen-West der RWTH Aachen

Das Institut für Schienenfahrzeuge und Fördertechnik der RWTH Aachen besitzt auf seinem Betriebsgelände eigene Gleisanlagen und ist der Heimatbahnhof (Aachen-West) des Versuchsfahrzeuges „IFS-Erprobungsträger 1“. Anhand des Trassierungsplanes und Vermessungspunkten [115] wurde eine Streckendefinition für die Gleisanlagen erstellt.

In Abb. 74 sind auf der linken Seite die Gleisanlagen in einem lokalen NED-Koordinatensystem (KS-IFS, siehe Anhang D.2.8) dargestellt. Rote Linien beschreiben Geraden. Grüne Linien beschreiben Kreisbögen. Da es sich um Rangiergleise handelt, werden Geraden und Kreisbögen direkt miteinander verbunden, ohne einen Übergangsbogen einzufügen. Die Anfangs- und Endpunkte der Primitiven sind durch Kreuze markiert. Die Textfelder bezeichnen die einzelnen Primitiven. Abb. 74 zeigt auf der rechten Seite die identische Gleisanlage des IFS im WGS84-Koordinatensystem mit elliptischen Koordinaten (Längengrad, Breitengrad).

Die blauen Kreuze beschreiben Messpunkte von Vermessungsarbeiten [115], die zusätzlich zum Trassierungsplan als Referenzpunkte dienen.

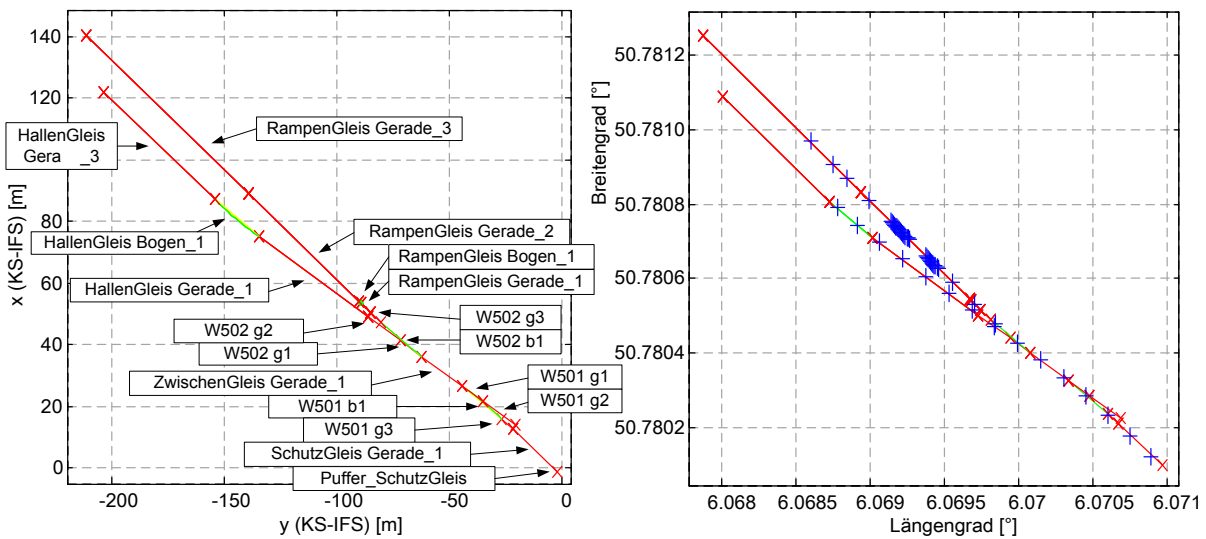


Abb. 74: links: IFS-Gleisanlage im lokalen Koordinatensystem, rechts: IFS-Gleisanlage im WGS84-Koordinatensystem mit Messpunkten

In Abb. 75 ist der Streckenplan im Szenario-Viewer (Abschnitt 4.7.9) auf einer OpenStreetMap-Karte dargestellt. Nördlich der Gleisanlagen liegt der Bahnhof Aachen-West. Auf der westlichen Seite sind die Versuchshalle mit dem Hallengleis und das Institutsgebäude eingezeichnet.

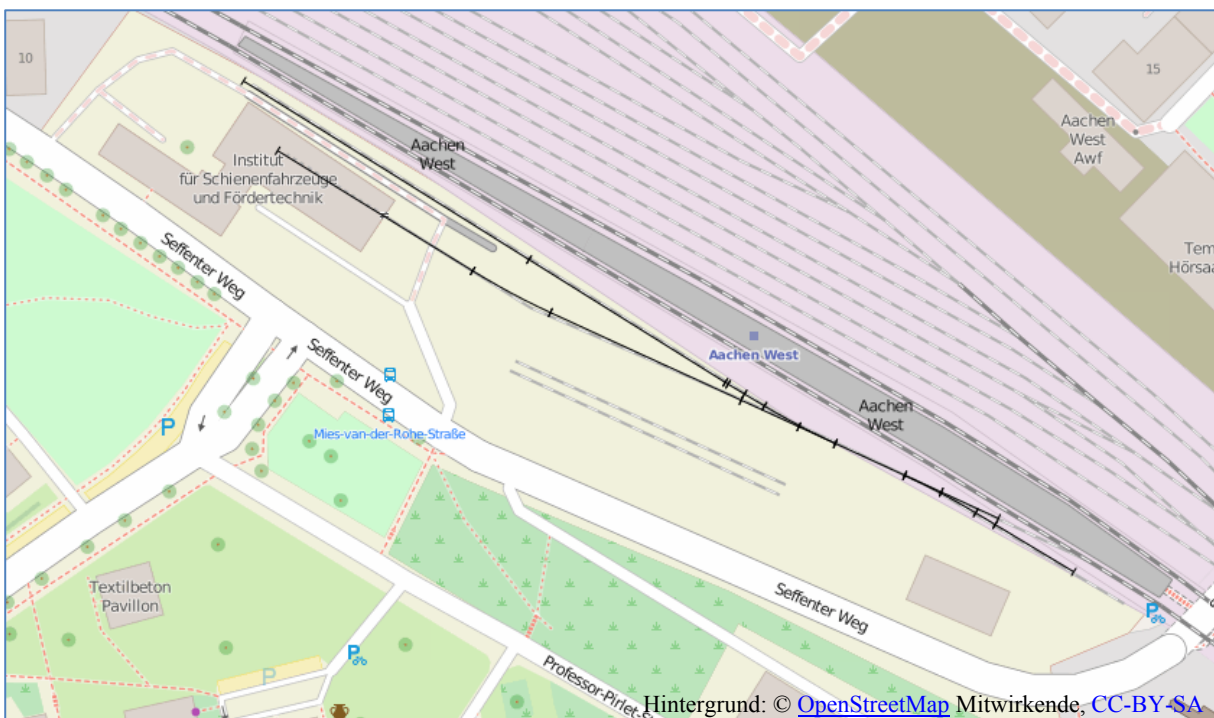


Abb. 75: IFS-Gleisanlagen im Szenario-Viewer dargestellt mit OpenStreetMap-Karte

5.14.2 Siemens Prüf- und Validationcenter in Wegberg-Wildenrath (PCW)

Das Testzentrum wurde bereits in Abschnitt 3.3.2 vorgestellt. Auf den Gleisanlagen des PCW sind im Rahmen der Projekte Galileo-above und SiPoS-Rail (Abschnitte 3.2.3 und 3.2.4) zahlreiche Messfahrten mit dem Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ durchgeführt worden. Aus dem Trassierungsplan und den Messdaten wurde eine Streckendefinition der umfangreichen Gleisanlagen für die Simulationsumgebung ausgearbeitet.

Das Testzentrum ist in verschiedene Gleisbereiche aufgeteilt. Jedes Gleis hat eine eindeutige Nummer und ist dadurch eindeutig einem Gleisbereich zugeordnet. Zur übersichtlichen und strukturierten Modellierung der Streckendefinition wurde für jeden Gleisbereich eine Teilstreckendefinition erstellt. Die Gleisbereiche wurden von einem Startpunkt aus unabhängig voneinander modelliert. In einem Gesamtmodell sind die Teilstreckendefinitionen durch die Verknüpfung der Verbindungsgleise miteinander gekoppelt.

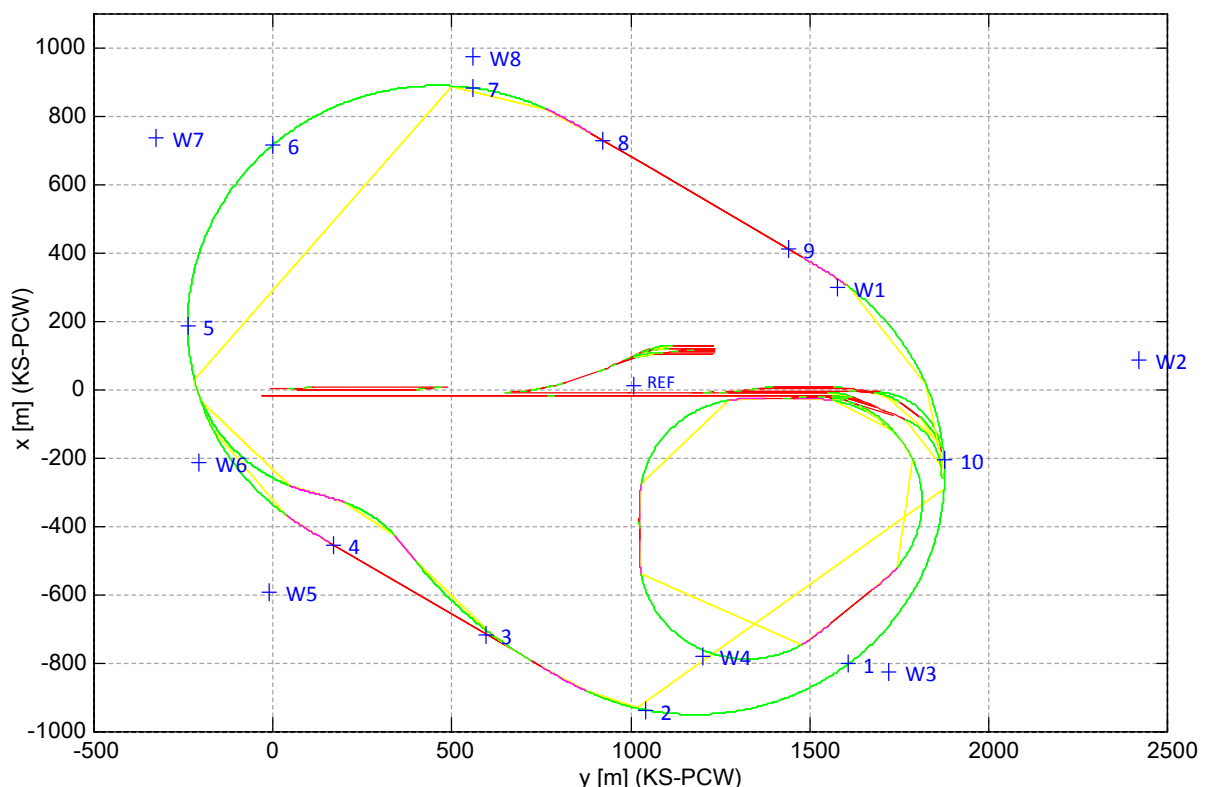


Abb. 76: Streckendefinition des PCW als MATLAB-Plot

Das sich aus den Rangiergleisen und den Testgleisen Testring T1, Testring T2 und Testgleis T3 sowie den Rangiergleisen ergebende Gleisnetz ist in Abb. 76 in dem für die Modellierung verwendeten lokalen Koordinatensystem dargestellt. Das lokale

Koordinatensystem „KS-PCW“ zur Trassierung der Gleisanlagen ist in Anhang D.2.7 beschrieben.

In der MATLAB-Streckendefinition (Abb. 76) ist die Art der dargestellten Primitiven durch Farben markiert: Bögen sind in Grün, Übergangsbögen in Magenta und Geraden in Rot dargestellt. Zur Übersicht sind in Gelb die Sekanten der Bögen eingezeichnet. Die blauen Kreuze sind eingemessene Wegmarken (Anhang A.7.4) auf der Gleismitte des Teststrings T1 als Referenzkoordinaten. Die Wegmarken haben eine eindeutige Nummer. In Anhang B.5 sind den Wegmarken eine Geokoordinate und die RFID-IDs der Haupt- und der zwei Hilfswegmarken zugeordnet. An den blauen Kreuzen mit der Bezeichnung „W1“ bis „W8“ befinden sich die Antennen der Pseudoliten der railGATE-Testumgebung (Abschnitt 3.3.3). Das blaue Kreuz mit der Bezeichnung „REF“ ist am Standort der Referenzstation des railGATE eingezeichnet.

5.14.3 Generische Strecken

Zur Algorithmenentwicklung ist es oft notwendig, die Software einer definierten Situation auszusetzen, um selektiv interessante Eigenschaften der Algorithmen untersuchen zu können. Als generische Streckendefinition wurde bisher ein 2000 *m* langes, gerades, horizontales Gleis ohne Überhöhung auf dem PCW-Gelände (zur Georeferenzierung) implementiert.

6 Validierung der Simulationsumgebung

Durch eine Validierung wird in diesem Kapitel die Realitätsnähe zwischen einem realen Schienenfahrzeug und der Simulationsumgebung nachgewiesen. Hierzu wird eine Messfahrt des Referenzfahrzeuges „IFS-Erprobungsträger 1“ mit der nachgestellten Situation in der Simulationsumgebung untersucht.

Abschnitt 6.1 beschreibt die Eigenschaften der Testfahrt. Die Instrumentierung des Versuchsfahrzeuges und die verwendeten Randbedingungen werden als Konfiguration des Simulationsszenarios in Abschnitt 6.2 vorgestellt. Die sich aus der verteilten Positionierung der Bewegungssensoren auf dem Schienenfahrzeug ergebenden komplexen geometrischen Verhältnisse stellt Abschnitt 6.3 exemplarisch an einer Wegmarke vor.

Der Verlauf der Positionsabweichung wird in Abschnitt 6.4 dargestellt und als Genauigkeitsnachweis diskutiert. Qualitätskriterium ist die Positionsabweichung zwischen dem genauesten GPS-Empfänger auf dem realen Versuchsfahrzeug und dem nachgebildeten Sensormodell in der Simulationsumgebung. Mit diesem Validierungsansatz wird ebenfalls die Streckendefinition, auf der sich das Fahrzeugmodell bewegt, geprüft.

In Abschnitt 6.6 werden die Ergebnisse den Zielen, Erwartungen und dem Stand der Wissenschaft und Technik eingeordnet und bewertet. Auf eine qualitative Bewertung der Validierungsergebnisse wird bis dahin konsequent verzichtet, um zwischen einer neutralen technischen Beschreibung und einer wertenden Einordnung der Ergebnisse klar zu trennen.

6.1 Beschreibung der Testfahrt des IFS-Erprobungsträgers

Am 31.10.2014 hat das Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ eine Testfahrt auf dem Testring T1 des Prüf- und Validationcenters Wildenrath (PCW) durchgeführt. Während dieser Testfahrt wurde der Messdatensatz 280 aufgenommen, in der das Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ den Testring T1 mit rund 80 km/h einmal in absteigender Kilometrierung (Abb. 78, entgegen dem Uhrzeigersinn) umrundete.

Der IFS-Erprobungsträger fuhr ab Strecken-Kilometer 0,523590 km (Koordinatenursprung des Wagenkasten-Koordinatensystems) in Fahrtrichtung FR2. Die Testfahrt begann um 2:18:30.490 Uhr UTC (2:18:46,490 GPS) und dauerte 363,271 Sekunden.

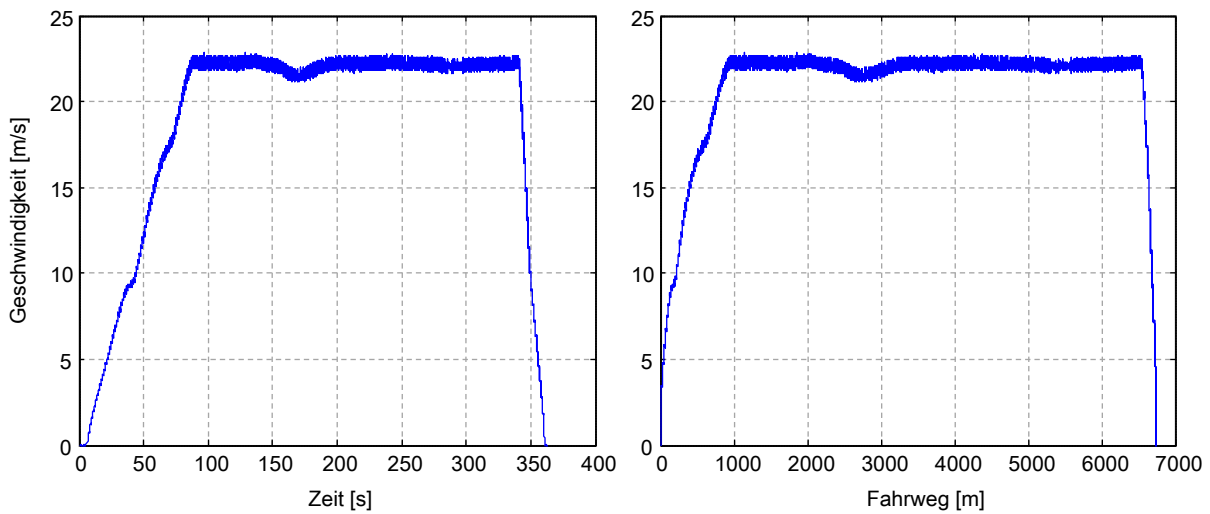


Abb. 77: Referenzgeschwindigkeit des IFS-Erprobungsträgers auf der Testfahrt

In Abb. 77 ist das Geschwindigkeitsprofil der Testfahrt dargestellt. Die GPS-Zeit ist der UTC-Zeit zum selben Zeitpunkt im Jahr 2014 um 16 Schaltsekunden voraus. Bei der Testfahrt beschleunigte das Schienenfahrzeug aus einer Stillstandssituation heraus auf rund 80 km/h ($22,2 \text{ m/s}$) und hielt diese Geschwindigkeit, um nach einer Umrundung ($6081,100 \text{ m}$) und 662 m wieder zum Stillstand zu kommen.

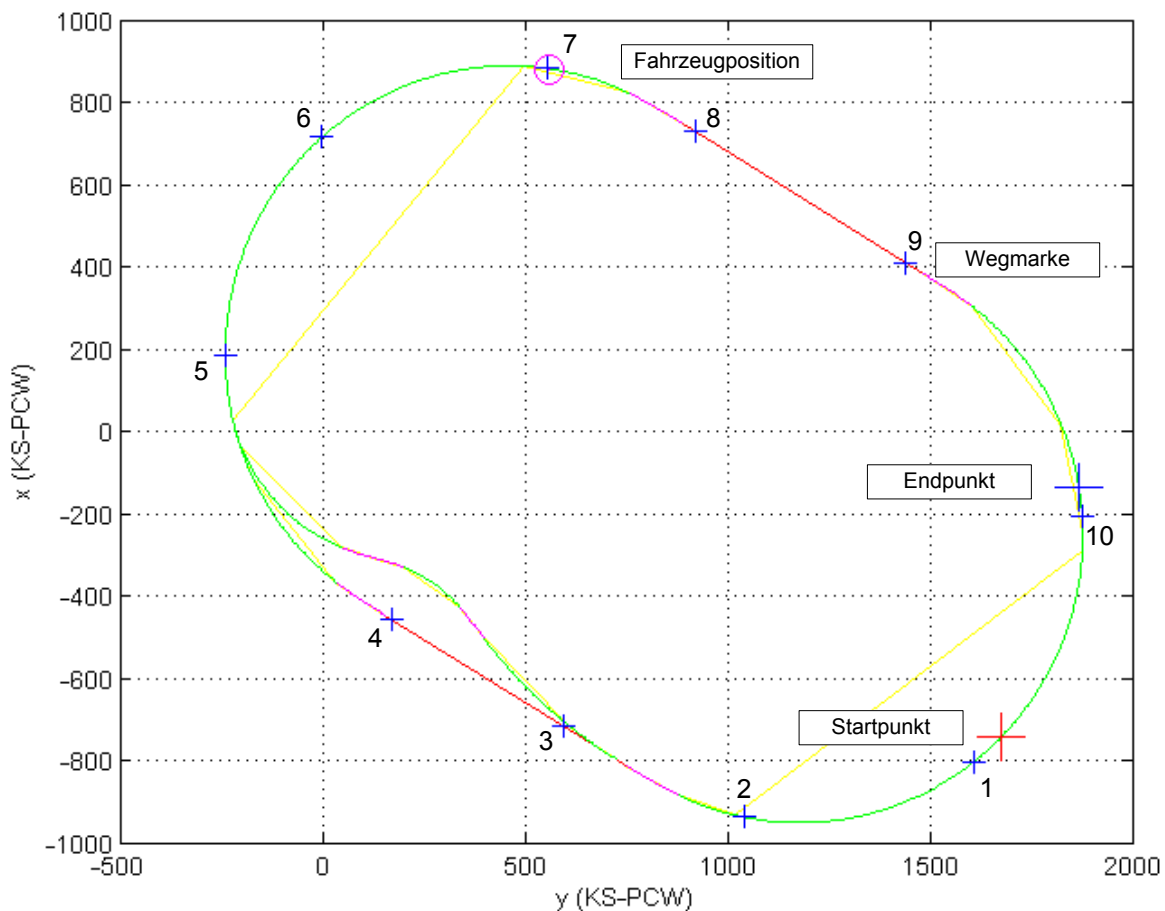


Abb. 78: Streckendefinition mit Wegmarken, Start- und Endpunkt

Die Referenzgeschwindigkeit des IFS-Erprobungsträgers wurde aus den Messsignalen zweier momentfrei mitlaufender Messräder (Anhang A.5.1) berechnet. Die Darstellung zeigt das ungefilterte Messsignal mit 1000 *Hz* Abtastrate.

In Abb. 78 ist die verwendete Streckendefinition des Teststrings T1 im lokalen Koordinatensystem KS-PCW als MATLAB-Diagramm dargestellt. Der Startpunkt ist als rotes Kreuz und der Endpunkt als blaues Kreuz auf der Streckendefinition des Teststrings eingezeichnet. Die innenliegende Neigetechnikschleife des Teststringes ist zur Orientierung des Lesers eingezeichnet und wurde nicht befahren. Als gelbe Linien sind die Sekanten der Kreisbogenelemente eingezeichnet. Die blauen Kreuze beschreiben die Geoposition der auf der Testfahrt ausgelegten Wegmarken. Alle Wegmarken sind zur späteren eindeutigen Benennung nummeriert. In Abschnitt 6.3 wird das Verhalten des Schienenfahrzeugs an der eingekreisten Wegmarke 7 detailliert vorgestellt.

Alle Sensorsignale auf der Testfahrt des IFS-Erprobungsträgers wurden mit einer Abtastfrequenz von 1000 *Hz* (Samplezeit: 0,001 *s*) aufgenommen. Sensoren mit einer geringeren Abtastfrequenz (z.B. GNSS-Sensoren mit 1 *Hz* und 10 *Hz*) wurden in der Messdatennachbearbeitung (postprocessing) zwischen den Messpunkten auf das Zeitraster von 0,001 *s* linear interpoliert.

6.2 Beschreibung des Simulationsszenarios

Die Simulationsumgebung wird für dieses Szenario folgendermaßen konfiguriert:

Die Streckendefinition der PCW-Gleisanlage (Abschnitt 5.14.2) wurde in einer MATLAB-Software „SimU-Streckengenerator“ (Abschnitt 4.7) erstellt und als railML-Datei verwendet. Darin sind alle Streckenelemente der Gleisanlage (Abb. 79) als verkettete Elemente mit ihren Eigenschaften beschrieben.

Der Fahrplan wird ebenfalls in der railML-Datei vorgegeben. Er beschreibt in einer Liste alle Streckenelemente, die aneinandergereiht den Fahrweg bilden (Anhang B.2). Als Betriebsstellen („Operational Control Points“, OCPs) werden der exakte Startpunkt der Testfahrt sowie die Start- und Endpunkte der nördlichen und südlichen Geraden des Teststrings T1 als charakteristische Punkte konfiguriert. In Anhang B.2 sind der Fahrplan und die Betriebsstellen dokumentiert.

Der Streckenatlas-Server erzeugt aus dem Startpunkt und der Fahrwegliste des Fahrplanes eine Streckendefinition als Datei (Anhang B.4) für das SIMPACK-Modell. Der für SIMPACK erzeugte Fahrweg beginnt 20 *m* vor dem Startpunkt, da das Fahrzeugmodell mit dem Fahrzeugkörper auf eine vorhandene Strecke vor dem Startpunkt positioniert werden muss. Zur Streckendefinition in SIMPACK nutzt man einen Polygonzug, der die Gleisachse in einem dreidimensionalen lokalen Koordinaten-

system beschreibt. Als vierter Parameter wird die Gleisüberhöhung an jedem Punkt des Polygonzuges angegeben (Anhang B.4). SIMPACK erwartet, dass die Streckendefinition im SIMPACK-Basiskoordinatensystem I_{sys} im Koordinatenursprung und horizontal in der XY-Ebene beginnt. Hierfür werden vom Streckenatlas-Server die Parameter der Koordinatentransformation vom ECEF in das Mehrkörperkoordinatensystem (KS-MKS) berechnet und die SIMPACK-Strecke erzeugt. Die Parameter der Koordinatentransformation werden dem Simulink-Zentralmodell für die Rücktransformation vom Mehrkörperkoordinatensystem in das ECEF-Koordinatensystem zur Verfügung gestellt.

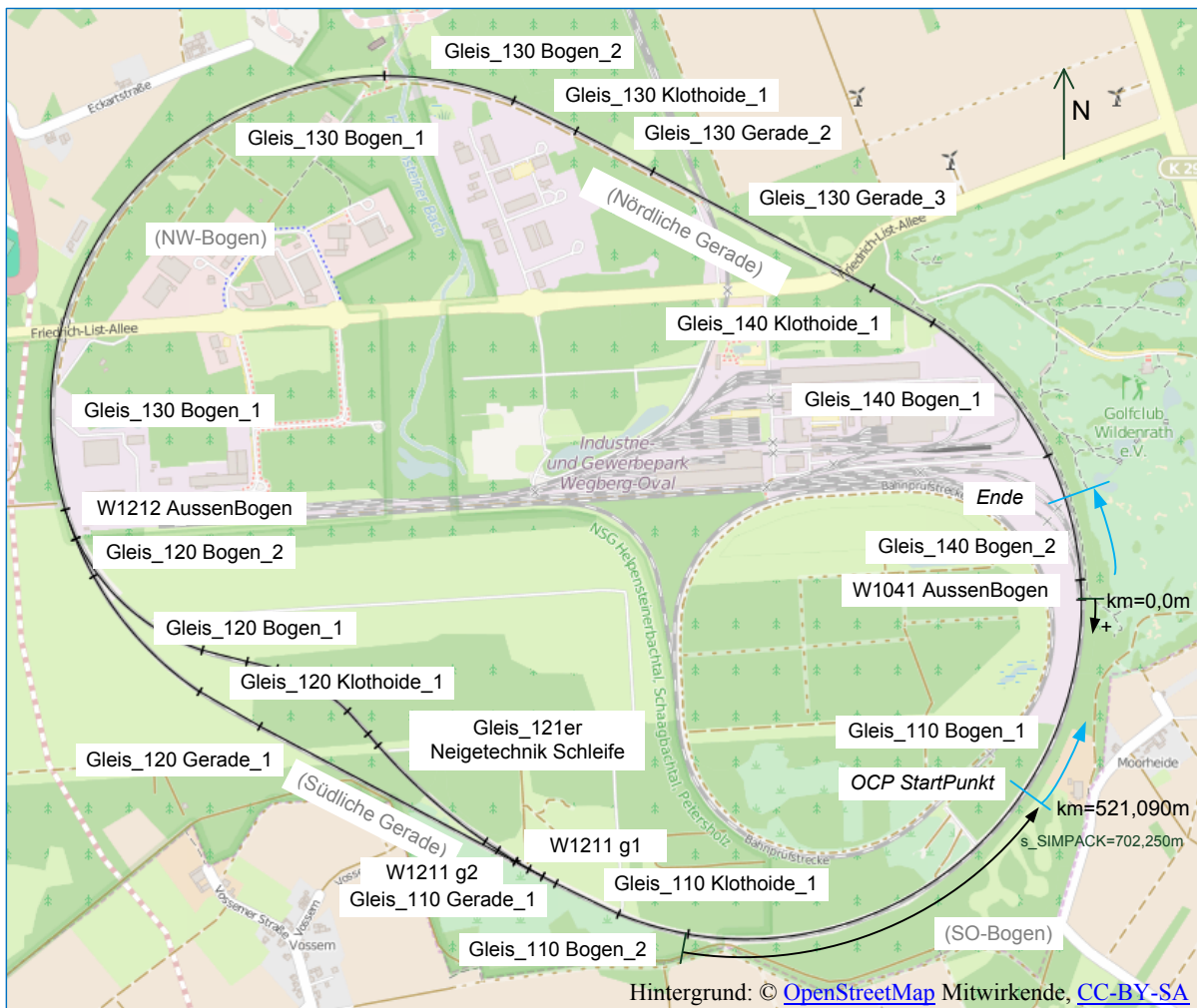


Abb. 79: Szenario-Live-Viewer mit der Streckendefinition für den PCW-Testring T1 und beschrifteten Streckenelementen (Hintergrund: OpenStreetMap [116])

Das Fahrzeugmodell wird durch einen „Rheonomic Rail Track Joint“ (siehe Abschnitt 5.8.2.3) am Marker des Drehgestell-1-Körpers (DG1) auf den Startpunkt der Streckendefinition in der SIMPACK-Simulation gesetzt. Abb. 80 zeigt das kommentierte Mehrkörpermodell in der Entwicklungsansicht mit den im Wagenkastenkörper definierten Marker-Koordinatensystemen.

Die Bewegung des Fahrzeugmodells auf der Fahrstrecke wird durch eine vom Startpunkt der Streckendefinition ausgehende Distanzvorgabe dem Joint des Drehgestell-1-Körpers vorgegeben. Als Distanzsignal dient die auf dem IFS-Erprobungsträger bei der Testfahrt gemessene Distanz der momentfrei mitlaufenden Messräder (MLR-Sensoren, Mittelwert der Sensorsignale von linker und rechter Schiene, Anhang A.5.1). Dadurch wird die Längsbewegung des realen Versuchsfahrzeuges auf der Testfahrt und des Schienenfahrzeugmodells in der Simulation synchronisiert.

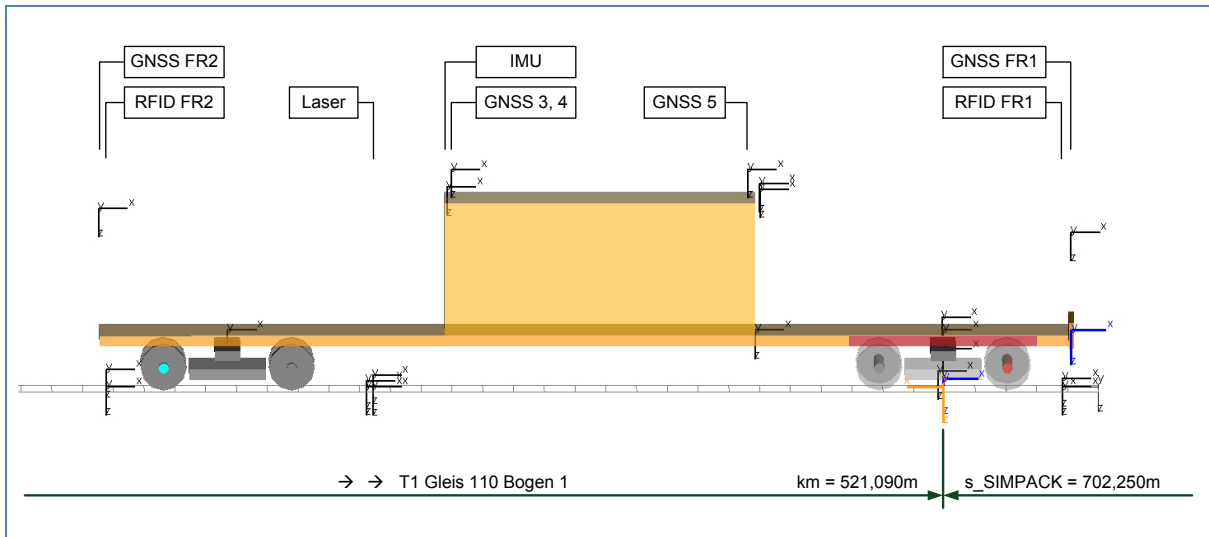


Abb. 80: SIMPACK-Modell in Startsituation

Im eindimensionalen Bewegungsmodell (Abschnitt 5.7.1, Abb. 48) des Simulink-Zentralmodells ist von der Geschwindigkeitsvorgabe des Fahrermodells auf die Distanzvorgabe der Messfahrt umgeschaltet worden. Die Variablen „EPT_meas_s/v“ enthalten die Distanz- und Geschwindigkeitssignale (Abb. 77) als Zeitreihe, die zeit-synchronisiert in die Simulink-Simulation eingespielt werden. Die Simulationsdaten des Simulink-Zentralmodells werden mit 1000 Hz aufgezeichnet.

6.3 Situation an Wegmarke 7

Zum Zeitpunkt 2:21:23.490 Uhr UTC (Sample 173000) passiert das Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ die Wegmarke 7 an Kilometer 4,2 nach einer gefahrenen Distanz von 2391,261 m (siehe eingezeichneten Kreis in Abb. 78). Zur Darstellung der geometrischen Verhältnisse sind in Abb. 81 als Draufsicht die Streckendefinition und die Spur charakteristischer Fahrzeugpositionen und Positionssensoren eingezeichnet.

Zum Zeitpunkt der Überfahrt sind die Positionen folgender Sensoren durch Kreuze markiert:

- EPT GNSS-3 Sensor (Leica Viva GS10 mit SAPOS) auf dem Dach des Containers in Fahrtrichtung FR2 (Farbe: Blau)

- EPT GNSS-4 Sensor (Septentrio AsteRx3 HDC) an der gleichen Antenne wie EPT GNSS-3 (Farbe: Schwarz)
- Die simulierten Positionen der SimU GNSS-3 und SimU GNSS-5 Sensoren (Farben: Cyan, Grün)
- Die Position der simulierten RFID-Antennen (SimU RFID FR1 / RFID FR2) in Fahrtrichtung FR1 und FR2 (Farbe: Schwarz)
- Die simulierten GNSS-Sensoren (SimU GNSS FR1 / GNSS FR2) an der Spitze des Schienenfahrzeuges (Farben: Cyan/Magenta).

Zusätzlich sind die Kontaktpunkte der Drehgestelle (DG FR1 / DG FR2) mit der Gleisachse als rote Kreuze eingezeichnet und mit einer roten Linie verbunden.

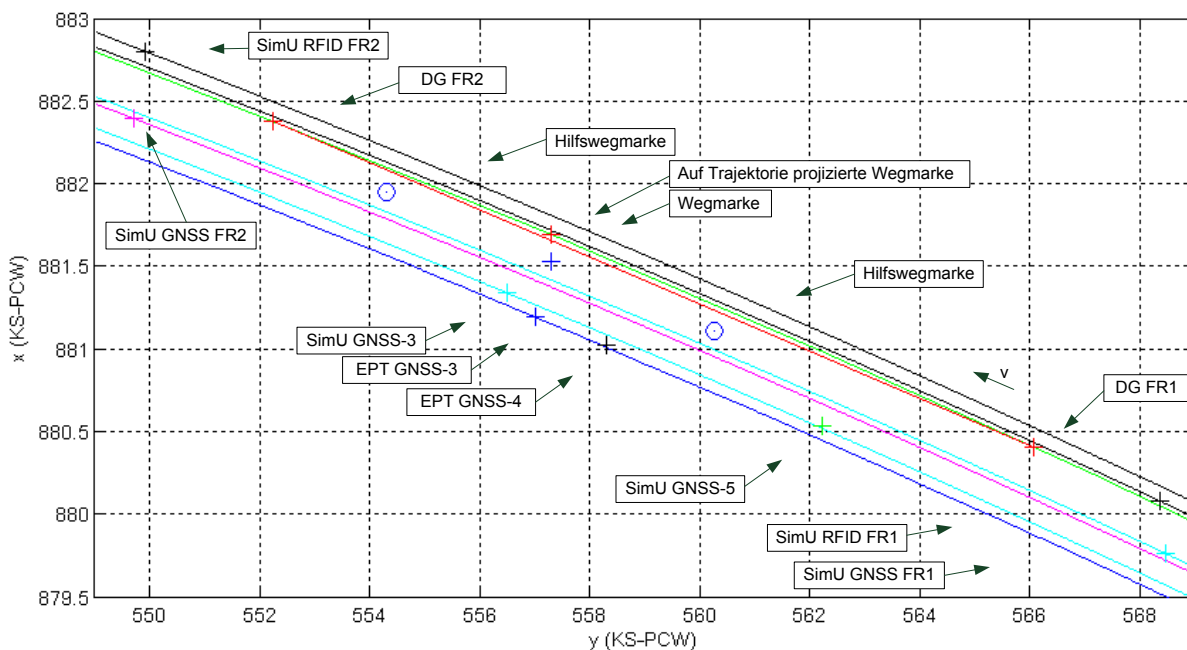


Abb. 81: Geometrische Situation an einer Wegmarke

In Abb. 81 ist auf der rechten Seite in Grün die Gleisachse des Gleisbogens „Gleis_130 Bogen 2“ (Radius 700 m) dargestellt. Das Gleis ist an dieser Stelle 150 mm überhöht.

Das einzelne blaue Kreuz beschreibt den geodätisch eingemessenen Mittelpunkt der Hauptwegmarke. Der Punkt ist um 162 mm zum Bogeninneren versetzt. Das auf der Gleisachse dargestellte rote Kreuz beschreibt die auf die Gleisachse projizierte Position der Hauptwegmarke. Die blauen Kreise beschreiben die Lage der ausgelegten Hilfswegmarken fünf Schwellen vor und hinter der Hauptwegmarke. In einer Wegmarkengruppe sind die Hilfswegmarken durch ihren Abstand zur Hauptwegmarke definiert (nicht geodätisch vermessen) und sind näherungsweise als Kreise eingezeichnet.

Die Verbindung des Schienenfahrzeuges zur Gleisachse stellen die Drehgestelle her. Der Wagenkasten bildet zwischen den Drehgestellen eine Sekante des darunter liegenden Bogens (rote Linie zwischen den Kreuzen der Drehgestelle SimU DG FR1 / SimU DG FR2).

Die schwarzen Linien rechts der Gleisachse beschreiben die Spur (auf Schienenkopfhöhe) der sich an den Fahrzeugspitzen befindenden RFID-Antennen. Die RFID-Antennen sind rund $2,3\text{ m}$ vor dem Drehkranz (Drehgelenk um die Hochachse zwischen Wagenkasten und Drehgestellbaugruppe) der Drehgestelle angeordnet. Die Vorverlagerung der RFID-Antennen vor die Drehgestelle führt durch die Krümmung im Bogen zu einer zum Bogenäußeren versetzten Spur. Die RFID-Antennen sind am Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ nicht exakt mittig angeordnet, was zu einem zusätzlichen seitlichen Versatz der Spuren führt.

Die GNSS-Antennen befinden sich auf dem Containerdach in rund $4,25\text{ m}$ Höhe über der Schienenoberkante. Die Überhöhung im Bogen führt zu einem seitlichen Versatz von rund 420 mm zum Bogeninneren. Durch die Anordnung der Antennen zwischen den Drehgestellen wird der senkrecht zur Gleisachse gemessene bogeninnere Versatz um 34 mm (GNSS-3 Sensor) erhöht.

In Cyan ist die Spur der simulierten SimU GNSS-3-/GNSS-4-Antennenposition der Simulationsumgebung eingezeichnet. Im Vergleich dazu ist in Blau die Spur des Sensors EPT GNSS-3 und in Schwarz die Spur des Sensors EPT GNSS-4 des IFS-Erprobungsträgers eingezeichnet. Durch eine Messabweichung in der Distanzmessung des IFS-Erprobungsträgers (Abb. 82) wird das simulierte Schienenfahrzeug auf der Gleisachse in Fahrzeuginnenrichtung versetzt positioniert. Dies führt zu einem systematischen Versatz der simulierten GNSS-Positionen. Dies ist eine Eigenschaft der Validierungssimulation und nicht der Simulationsumgebung.

Auf dem IFS-Erprobungsträger sind die Sensoren EPT GNSS-3 und EPT GNSS-4 an dieselbe Antenne angeschlossen. Die Positionsabweichung zwischen den Sensoren wird als Positionsmessabweichung und eine unterschiedliche (nicht korrigierte) zeitliche Verzögerung interpretiert.

Die systematisch gegenüber der simulierten Position von rund 74 mm zum Bogeninneren versetzte Spur des gemessenen GNSS-3-/GNSS-4-Empfängers wird durch den Einfluss der nicht im Mehrkörpersimulationsmodell enthaltenen Rollbewegung des Wagenkastens (relativ zur Schienenoberkante) durch die ungleichmäßige Einfederung der linken und rechten Sekundärfederung erklärt.

Die durch ein grünes Kreuz eingezeichnete Position des simulierten Empfängers SimU GNSS-5 dient zur vollständigen Darstellung. Ein Messsignal des Empfängers EPT GNSS-5 auf dem IFS-Erprobungsträger war an dieser Position nicht verfügbar.

6.4 Positionsabweichung über der gesamten Messfahrt

Die Genauigkeit des Simulationsergebnisses wird in einem Vergleich zwischen den Positions-Messsignalen des Referenzfahrzeuges „IFS-Erprobungsträger 1“ und der Simulationsumgebung analysiert. Hierzu wird eine charakteristische Testfahrt des IFS-Erprobungsträgers (Abschnitt 6.1) in der Simulationsumgebung nachgestellt. In dieser Gegenüberstellung der real gemessenen und der ideal simulierten Signale ergeben sich Abweichungen, die durch Störungen auf die reale Messung und durch Modellierungsabweichungen entstanden sind. Die Messsignale des IFS-Erprobungsträgers sind in einer Messdatenverarbeitung (Postprocessing) aufbereitet und kalibriert worden. Im Folgenden werden die Abweichungen analysiert und anhand charakteristischer Merkmale dessen Ursache interpretiert.

Zur Untersuchung der Positionsabweichungen zwischen dem IFS-Erprobungsträger und der Simulationsumgebung eignet sich der kontinuierliche Vergleich der GNSS-Sensorpositionen und die Analyse der Wegmarkenüberfahrten. Der GNSS-Sensor mit der höchsten Lokalisierungsqualität auf dem IFS-Erprobungsträger ist der Sensor EPT_GNSS-3 (Leica Viva GS10, Anhang A.8.3). Er dient als Lokalisierungsreferenz des IFS-Erprobungsträgers.

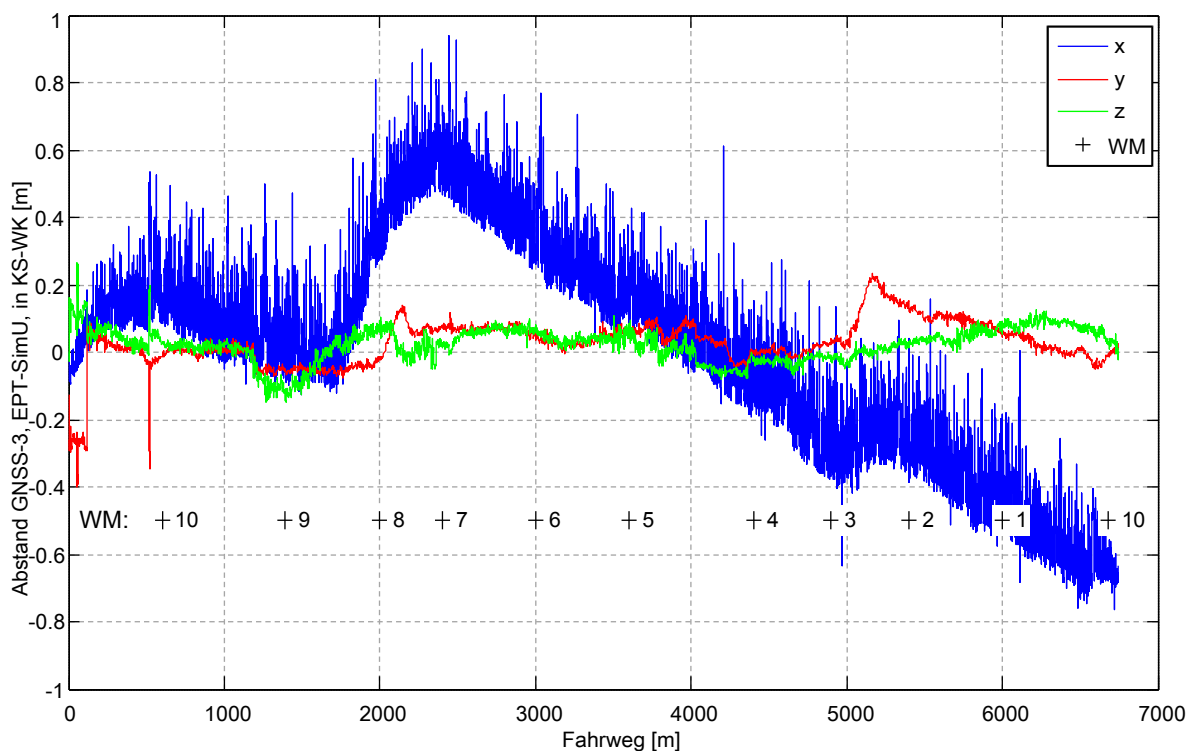


Abb. 82: GNSS-3-Positionsabweichung zwischen IFS-Erprobungsträger und Simulationsumgebung, mit Wegmarkenpositionen (WM)

In Abb. 82 ist die Positionsabweichung zwischen der gemessenen und der simulierten GNSS-3-Sensorposition im Wagenkasten-Koordinatensystem (fahrzeugfest) dargestellt. In diesem Koordinatensystem lassen sich die Abweichungen in Längs-, Quer- und Vertikalrichtung zur Gleisachse darstellen. Sie werden in den folgenden drei Absätzen diskutiert.

Abb. 82 zeigt in Blau, über die gefahrene Distanz aufgetragen, die Positionsabweichung in X-Richtung (Fahrtrichtung). Der hohe Rauschanteil entsteht durch einen zeitlichen Jitter bei der Übertragung der Positionsinformation vom GNSS-3-Sensor in die Messdatenerfassung (RCP-System) auf dem IFS-Erprobungsträger. Die Positionsabweichung entsteht durch Messabweichungen der Distanzmessung auf dem IFS-Erprobungsträger. Das simulierte Fahrzeugmodell wird mit dem gemessenen Distanzsignal (Abb. 77) auf der Gleisachse positioniert. Die Abweichung in der Distanzmessung auf dem IFS-Erprobungsträger führt zu einem versetzt positionierten Fahrzeugmodell in der Mehrkörpersimulation.

In Rot ist der seitliche/laterale Versatz (Y-Richtung) dargestellt. Zu Beginn der Testfahrt beträgt die Messabweichung des GNSS-3-Sensors $0,27\text{ m}$. Nach 120 m springt die Messabweichung in das Toleranzband von $\pm 0,2\text{ m}$. Ein ähnlicher Verlust der Lokalisierungsgenauigkeit tritt nach rund 520 m auf. Im Verlauf der Testfahrt sind charakteristische Abweichungen zu erkennen, deren Anfang und Ende mit der Überhöhung im Bogen korrelieren. Die seitliche Abweichung beträgt maximal $0,2\text{ m}$ und stellt die Abweichung der gesamten Werkzeugkette und der nicht bekannten Störungen dar. Die dargestellten Abweichungen sind in aufeinanderfolgenden Simulationen reproduzierbar und werden als systematischer Abweichung eingeschätzt. Der konstante oder linear veränderliche Verlauf der Abweichung in Abb. 82 lässt auf eine systematische Abweichung der geplanten oder gebaute Trasse zur modellierten Trasse in der Simulationsumgebung schließen.

In Grün ist die Höhenabweichung dargestellt, die sich meist in einem Band von $\pm 0,1\text{ m}$ befindet. Im Höhenmodell sind die Abrundungen an Gradientenänderungen nicht enthalten, die einen Teil der Höhenabweichung verursachen. Wie bei der seitlichen Abweichung wird aus dem linearen und sinusförmigen Verlauf der Abweichung auf eine systematische Störung der geplanten oder modellierten Trassierung geschlossen.

Zur besseren Einordnung der Streckenteile sind die Positionen der Wegmarken als Kreuze eingezeichnet. Die Lage der Wegmarken ist in Abb. 78 dargestellt.

Zu welchen Anteilen die hier gezeigten Abweichungen durch Lagetoleranzen der verlegten Gleise, Modellierungsungenauigkeiten und Messabweichungen des IFS-Erprobungsträgers entstanden sind, kann hier nicht geklärt werden. Die Darstellung soll das vorhandene Genauigkeitsniveau der Kombination aus IFS-Erprobungsträger und der Simulationsumgebung dokumentieren.

6.5 Positionsabweichungen an den Wegmarken

Der Vergleich zwischen der in Abschnitt 6.1 beschriebenen Messfahrt und deren Nachbildung in der Simulationsumgebung soll in diesem Abschnitt anhand fester Wegmarkenpositionen durchgeführt werden.

Auf der Messfahrt wurden zehn Wegmarken (Anhang A.7.4) ausgelegt und geodätisch vermessen (Anhang A.7.5). Wie in Abb. 125 dargestellt, befinden sich die Wegmarken in der Gleismitte. Als Höhe wird die Schienenoberkante definiert. Die Positionen der Wegmarken sind in Abb. 76 und Abb. 78 dargestellt. Die Koordinaten sind in Anhang B.5 abgelegt.

In der Simulationsumgebung ist unabhängig von den Wegmarkenpositionen eine Gleisachse definiert, die in diesem Szenario ideal befahren wird. Der Marker des Drehgestells DG1 auf Schienenoberkante befindet sich ideal auf der Gleisachse, und dessen ECEF-Position wird zu jedem Simulationsschritt berechnet.

Der Abstand zwischen dem Marker am Drehgestell DG1 auf Schienenoberkante und die ECEF-Positionen der Wegmarken werden zu jedem Simulationsschritt bestimmt. Als ideales Kriterium zur Definition der Überfahrt über eine Wegmarke wird der minimale horizontale Abstand (2D) zwischen dem Marker des Drehgestells DG1 auf Schienenoberkante und der Wegmarkenposition definiert.

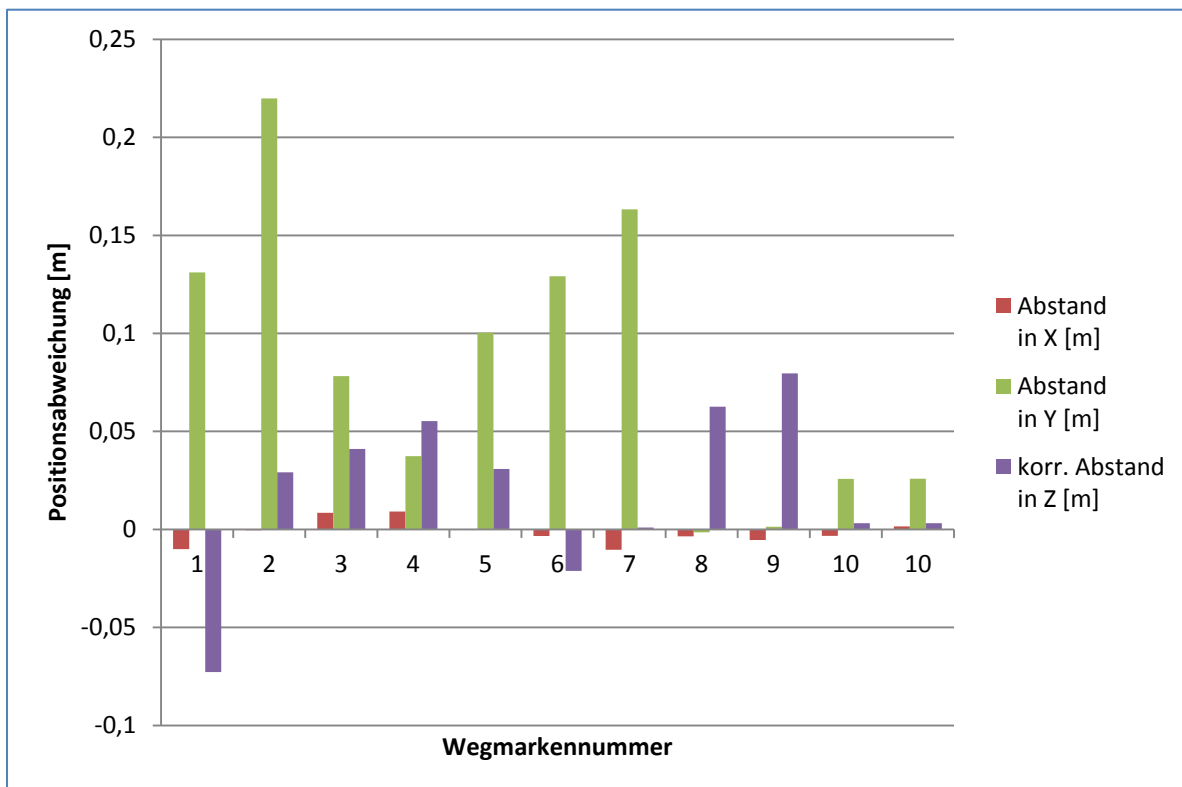


Abb. 83: Wegmarken-Positionsabweichung im Fahrzeugkoordinatensystem

Daraus ergeben sich die in Abb. 83 dargestellten Abweichungen tangential (X), lateral (Y) und vertikal (Z) im Fahrzeugkoordinatensystem. Die vertikale Z-Komponente ist in Abb. 83 um eine systematische Abweichung von 0,6 m korrigiert worden. Die Wegmarke 10 wurde zu Beginn und am Ende der Messfahrt überfahren.

In lateraler Richtung gibt es bei den meisten Wegmarken einen deutlichen zum bogeninneren versetzten Abstand von bis zu 220 mm. Auffälligerweise ist die Abweichung im NO-Bogen (Wegmarke WM6 und WM7) und im SW-Bogen (Wegmarke WM1 und WM2) am größten, während die lateralen Abweichungen auf den Geraden (Wegmarken WM3, WM4, WM8, WM9) die Minima bilden.

Die korrigierte Höhenabweichung wird auf eine nicht korrigierte Höhenabweichung zwischen der Wegmarke und der GNSS-Antenne bei der Positionsbestimmung der Wegmarke (siehe Abb. 126) zurückgeführt.

Auf den Vergleich der ausgewerteten Wegmarkenauslesung des Versuchsfahrzeuges „IFS-Erprobungsträger 1“ zur Bestimmung der Wegmarkenüberfahrt in der Simulationsumgebung wird in der Beschreibung des Sensormodells der RFID-Wegmarkensensorik in Abschnitt 7.2.3 eingegangen.

Die in Abb. 83 dargestellten lateralen Abweichungen sind durchschnittlich um 56 mm größer als die in Abb. 82 darstellten Abweichungen des EPT GNSS-3-Sensors.

6.6 Bewertung der Validierungsergebnisse

Um die Simulationsumgebung zu validieren, wird im sechsten Kapitel eine Messfahrt des Versuchsfahrzeuges „IFS-Erprobungsträger 1“ mit der nachgestellten Versuchsfahrt in der Simulationsumgebung verglichen. Anhand der Szenariobeschreibung werden die Systematik der Streckendefinition und der Parametrierung in der Simulationsumgebung deutlich. Für die Streckendefinition wird die im Eisenbahnbereich übliche Trassierung in anwendbaren und nachvollziehbaren Datenformaten umgesetzt. Das Schienenfahrzeugmodell wurde in dem benutzerfreundlichen Mehrkörpersimulationsprogramm SIMPACK aufgebaut. Die geometrischen Abmaße und die Sensorpositionen entsprechen dem Referenzfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“. Die in Anhang A.10 definierten Körper und Körperkoordinatensysteme des Referenzfahrzeuges lassen sich auf das Schienenfahrzeugmodell vollständig abbilden. Die Koordinaten der Sensorpositionen (Anhang A.11) werden im Mehrkörpersimulationsmodell (Abb. 80) ohne Koordinatentransformationen verwendet. Dies zeigt eine durchgängige und systematische Beschreibungsweise des Referenzfahrzeuges IFS-Erprobungsträger und des Mehrkörpersimulationsmodells.

In Abb. 81 wird die komplexe Verteilung der Positionssensorik während einer Simulation beispielhaft an einer Wegmarke gezeigt. Die eindeutige Definition der Sensorpositionen in den verteilten Koordinatensystemen (Abschnitt 4.6) auf dem Schienenfahrzeug unterstützt die Simulation realitätsnaher komplexer Bewegungen. Die Systematik der verteilten Koordinatensysteme (Abschnitt 4.6) hat sich bei der Implementierung der Mehrkörpersimulationsmodelle und der Sensorikmodelle bewährt.

Die Positionsgenauigkeit der Simulationsumgebung wird in Abb. 82 exemplarisch durch den Vergleich der GNSS-3-Positionen aus der Simulationsumgebung und dem Referenzfahrzeug über eine gesamte Messfahrt analysiert. Mit dieser Methode werden alle Messabweichungen auf dem Referenzfahrzeug und Modellabweichungen in der Simulationsumgebung zusammengefasst dargestellt. Die absolute laterale und vertikale Abweichung beträgt maximal $\pm 0,2\text{ m}$ pro Richtung. Die Abweichungen in Fahrtrichtung von $\pm 0,6\text{ m}$ ergeben sich aus einer (sehr geringen!) Integrationsabweichung der Distanzsensorik des Referenzfahrzeuges. Die absolute Lokalisierungsgenauigkeit von $\leq 30\text{ mm}$ des GNSS-Referenzempfängers (A.8.3) ist auf langen Strecken systembedingt besser als die integrierend messende Distanzsensorik auf dem Referenzfahrzeug.

Die Analyse der Wegmarkenpositionen ergibt einen maximalen lateralen Versatz zur Gleisachse von 220 mm .

Die in dem Szenario erreichten Genauigkeiten werden für Navigationsanwendungen, bei denen Abweichungen von mehreren Metern zu erwarten sind, als akzeptabel eingeschätzt. Die geforderten Genauigkeiten der Odometrie im ETCS-Zugsicherungssystem von kleiner/gleich $5\text{ m} + 5\%$ der gemessenen Distanz wird vom IFS-Erprobungsträger und der Simulationsumgebung deutlich übertroffen. Für eine gleisselektive Ortung wird eine laterale Positionsgenauigkeit von kleiner eines halben Mindestgleisabstandes ($3,5\text{ m}$) von $1,75\text{ m}$ notwendig.

Zusammenfassend stellt die hier beschriebene Software eine funktionsfähige Simulationsumgebung dar, die für Odometrieanwendungen eine sehr gute Positionsgenauigkeit aufweist.

7 Simulationsergebnisse

Dieses Kapitel stellt die Funktionalität der Simulationsumgebung anhand der Simulationsergebnisse einer exemplarischen „Fahrt auf freier Strecke“ auf dem Testring T1 des Prüf- und Validationcenters in Wildenrath vor.

Die Eigenschaften der Basissoftware und grundlegende Funktionalitäten der Simulationsumgebung fasst Abschnitt 7.1 zusammen.

Die Simulationsergebnisse der Sensormodelle werden in Abschnitt 7.2 anhand der Modellstruktur für jedes Modell gezeigt und die modellierten Eigenschaften der aufeinander aufbauenden Teilmodelle herausgearbeitet.

Abschnitt 7.3 fasst die Ergebnisse der Satellitennavigationsimulation zusammen und stellt die Satellitenpositionen des Weltraumsegmentes sowie die daraus berechneten Rohdaten eines Satellitennavigationsempfängers vor. Das Szenario zeigt die funktionale Rohsignalgenerierung und die Methodik der Modellierung von Empfangsstörungen.

Im abschließenden Abschnitt 7.4 werden die in diesem Kapitel gezeigten Simulationsergebnisse eingeordnet und bewertet.

7.1 Analyse der Grundfunktionen der Simulationsumgebung

Die Grundfunktionen der Simulationsumgebung werden in diesem Abschnitt am Beispiel eines Fahrplanszenarios dargestellt. Das Szenario beschreibt exemplarisch eine Fahrt auf freier Strecke von einer Gerade in einen Bogen mit Geschwindigkeitswechsel. Daran werden die grundlegenden Funktionalitäten der Simulationsumgebung sichtbar.

Zur Einführung beschreibt Abschnitt 7.1.1 das Simulationsszenario. Den Simulationsablauf und die Interaktion der Softwareteile stellt Abschnitt 7.1.2 vor. Abschnitt 7.1.3 analysiert schrittweise den Verlauf des Szenarios. Die vom Streckenatlas-Server automatisiert erstellten Streckendefinitionen für die Mehrkörpersimulation und das Simulink-Zentralmodell beschreibt Abschnitt 7.1.4. Abschnitt 7.1.5 zeigt die Bewegungsvorgabe durch Infrastrukturserver an diesem Simulationsszenario.

Anmerkung: In den Szenarien werden Situationen geschaffen, in denen sich die Funktionalität der Simulationsumgebung anschaulich beschreiben lässt. Hierdurch kann es zur Darstellung technischen Eigenschaften kommen, die rein technisch korrekt

sind, aber im produktiven Einsatz üblicherweise anders angewendet werden. Um in einer kostensparenden Simulationsumgebung (gegenüber der in der Realität aufwendigen und kostenintensiven Eisenbahntechnik) neue Anwendungen untersuchen zu können, ist dies jedoch eine Intention dieser Arbeit.

7.1.1 Exemplarische „Fahrt auf freier Strecke“

In dem Simulationsszenario „Fahrt auf freier Strecke“ soll die grundlegende Funktionalität der Simulationsumgebung gezeigt werden. Hierfür wird die bereits in den Abschnitten 5.14.2 und 6.1 dargestellte Streckendefinition des PCW-Testringes T1 mit einem neuen Fahrplan (Anhang B.7) genutzt. Dieser Fahrplan beginnt am Anfang der südlichen Gerade (Abb. 84) an der eingezeichneten Betriebsstelle „oocp_PCW_T1_Gerade1_Anfang“ in aufsteigender Kilometrierung (im Uhrzeigersinn). Das Schienenfahrzeug fährt in Fahrtrichtung FR1 und hat vom Start an Kilometer 1519,120 m bis Kilometer 4140,010 m (gegen Ende des nordwestlichen Bogens) eine freigegebene streckenseitige Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h (22,2 m/s).



Abb. 84: Szenario-Live-Viewer während der Simulation (Hintergrund: OSM [116])

Im zweiten Teil der Testfahrt ist die streckenseitige Höchstgeschwindigkeit auf 40 km/h ($11,1\text{ m/s}$) herabgesetzt. Dies sind die für das Schienenfahrzeug in diesem Szenario maßgebenden Geschwindigkeitsgrenzen. Das Szenario endet mit einem Halt am Endpunkt der nördlichen Gerade an Kilometer $5257,111\text{ m}$ („ocp_PCW_T1_Gerade2_Ende“).

Abb. 84 zeigt in der Weboberfläche des Szenario-Live-Viewers (Abschnitt 4.5) die aktuelle Situation des Szenarios einige Sekunden nach dem Simulationsstart. In Schwarz ist das verwendete Gleisnetz eingezeichnet, und darauf ist in Blau der noch vor dem Schienenfahrzeug liegende Streckenverlauf markiert. Die grünen und roten Punkte sind Betriebsstellen, die im Fahrplan dieses Szenarios angegeben sind. Grüne Betriebsstellen kann das simulierte Schienenfahrzeug ohne Halt passieren. Vor rot markierten Betriebsstellen muss das Schienenfahrzeug anhalten und bekommt durch die ETCS-Streckenzentrale erst eine Fahrtfreigabe, wenn diese Betriebsstelle auf grün umgestellt wird. In der Weboberfläche können die Betriebsstellen während der Simulation mit dem Mauszeiger des Benutzers zwischen Grün und Rot umgeschaltet werden.

Die gelben Fahnen beschreiben die Position von ETCS-Eurobalisengruppen. Zur Veranschaulichung wurde zu Beginn jeder Primitive und alle 200 m eine ETCS-Eurobalisengruppe mit je zwei ETCS-Eurobalisen verlegt.

Die aktuelle Fahrzeugposition in der Simulation wird durch den blauen Marker angezeigt.

7.1.2 Eigenschaften der Ablaufsteuerung in MATLAB

Dieser Abschnitt stellt am Beispiel eines Simulationsszenarios das Wirken der in Abschnitt 4.3 beschriebenen Szenariosteuerung dar. In allen wichtigen MATLAB-Skriptdateien wird zu Beginn und am Ende des Skriptes eine Textausgabe im MATLAB-Prompt erzeugt. So werden alle wichtigen Schritte während eines Simulationsdurchlaufes zur Laufzeit angezeigt, um dem Benutzer eine Rückmeldung über den aktuellen Verarbeitungsstand zu geben (Abb. 85). Während eines Simulationslaufes wird folgende Ausgabe im MATLAB-Prompt erzeugt:

Anhand des in Abb. 85 dargestellten Ablaufes werden nun die Inhalte der Skripte kurz vorgestellt, um einen prinzipiellen Eindruck des Simulationsablaufes zu erhalten.


```
01
02      Willkommen zur IFS-Simulationsumgebung
03
04 Start start_saubermachen.m: 26-Jul-2015 11:32:44
05 Ende start_saubermachen.m: 26-Jul-2015 11:32:47
06 Start Config.m: 26-Jul-2015 11:32:47
07      Aktueller Pfad: D:\...\SimU\SimU-allg\Matlab
08 Ende Config.m: 26-Jul-2015 11:32:47
09 Start SimSzKonfig.m: 26-Jul-2015 11:32:48
10 Start SimSzKonfig_T1_GrundFkt_150722_1.m: 26-Jul-2015 11:32:48
11      SzenarioDatei: D:\...\SimU\Szenarios\PCW_T1_GrundFkt_150722_1.xml
12      CMG_Modell_Start Start ! SystemZeit: 26-Jul-2015 11:32:48
13      CMG_Modell_Start fertig! SystemZeit: 26-Jul-2015 11:32:49
14 Ende SimSzKonfig_T1_GrundFkt_150722_1.m: 26-Jul-2015 11:32:49
15 Ende SimSzKonfig.m: 26-Jul-2015 11:32:49
16 Start Sz_temp_config.m: 26-Jul-2015 11:32:49
17 Ende Sz_temp_config.m: 26-Jul-2015 11:32:49
18 Start init_SimU.m: 26-Jul-2015 11:32:49
19 Ende init_SimU.m: 26-Jul-2015 11:32:49
20 Warten auf Streckenatlas...
21 Start Teilsimulation: 1
22 Start prepare_SimStep.m: 26-Jul-2015 11:32:56
23 Ende prepare_SimStep.m: 26-Jul-2015 11:33:03
24 Start Vorbereitung des SIMPACK- und MATLAB-Modells
25 Start config_SimPackModell.m: 26-Jul-2015 11:33:03
26      subvar.str ( $_StartDistanz_Spitze_FR1 ) = 2.00E+01 ! StartPosition
27      subvar.str ( $_Start_Geschwindigkeit )    = 0.00E+00 ! StartGeschw
28      SIMPACK-Modell angepasst und Modell erstellt.
29 Ende config_SimPackModell.m: 26-Jul-2015 11:33:03
30 SIMAT Co-Simulation via IPC
31      Connecting to server address localhost at port 20000
32      SIMPACK-Inputs : 2
33      SIMPACK-Outputs: 52
34      SIMPACK-SubVars: 0
35 Simulation läuft seit 5 Sekunden
36 Simulation läuft seit 10 Sekunden
37 Simulation läuft seit 15 Sekunden
...
50 Start save_SimResults.m: 26-Jul-2015 11:49:54
51 Ende save_SimResults.m: 26-Jul-2015 11:49:55
52 Start prepare_next_SimStep.m: 26-Jul-2015 11:49:55
53 Ende prepare_next_SimStep.m: 26-Jul-2015 11:49:59
54 Ende Teilsimulation: 1
55 Start Postprocessor.m: 26-Jul-2015 11:49:59
56 Ende Postprocessor.m: 26-Jul-2015 11:50:04
57 Elapsed time is 1040.4133 seconds.
58 >>
```

Abb. 85: MATLAB-Prompt während eines Simulationsdurchlaufes

Ein Simulationsdurchlauf wird in der Simulationsumgebung durch den Start der Ablaufsteuerung im Skript „SimU_start.m“ begonnen. Nach einer Begrüßung und einer initialen Vorbereitung der MATLAB-Umgebung wird die Basiskonfiguration der Simulationsumgebung im Script „Config.m“ angelegt. Dann wird die szenario-abhängige Konfiguration der Simulationsumgebung aus dem Szenario-Konfigurations-skript „SimSzKonfig_T1_GrundFkt_150722_1.m“ erstellt.

Alle Dateien des Simulationsdurchlaufes werden in einer temporären Verzeichnisstruktur „temp_config“ gespeichert. Die Verzeichnisstruktur wird im Script „Sz_temp_config.m“ angelegt.

Zur Initialisierung des Simulink-Modells werden zusätzliche Umgebungsvariablen, z.B. die Uhrzeit, im MATLAB-Workspace im Script „init_SimU.m“ gesetzt. Daraufhin startet die Ablaufsteuerung den Python-Server für die Eisenbahninfrastruktur und den Streckenatlas sowie den SIMAT Co-Simulationsserver zwischen der Mehrkörpersimulation SIMPACK und Simulink.

Nun ist die Simulationsumgebung vorbereitet, um die erste Teilsimulation zu starten. Hierfür wird im Script „prepare_SimStep.m“ die Teilsimulation vorbereitet. Die SIMPACK- und MATLAB-Streckendaten werden vom Streckenatlas abgerufen und als MATLAB-Workspace-Variablen für das Simulink-Zentralmodell gespeichert. Die SIMPACK-Modelldatei wird in das „temp_config“-Verzeichnis kopiert und die Initialzustände in der Modelldatei (durch das Skript „config_SimPackModell“) gesetzt. Nun wird das konfigurierte Simulink-Zentralmodell (wie in Abb. 86 für den Benutzer sichtbar) zu Beginn jeder Teilsimulation automatisch geöffnet, ausgeführt und am Ende der Teilsimulation wieder geschlossen.

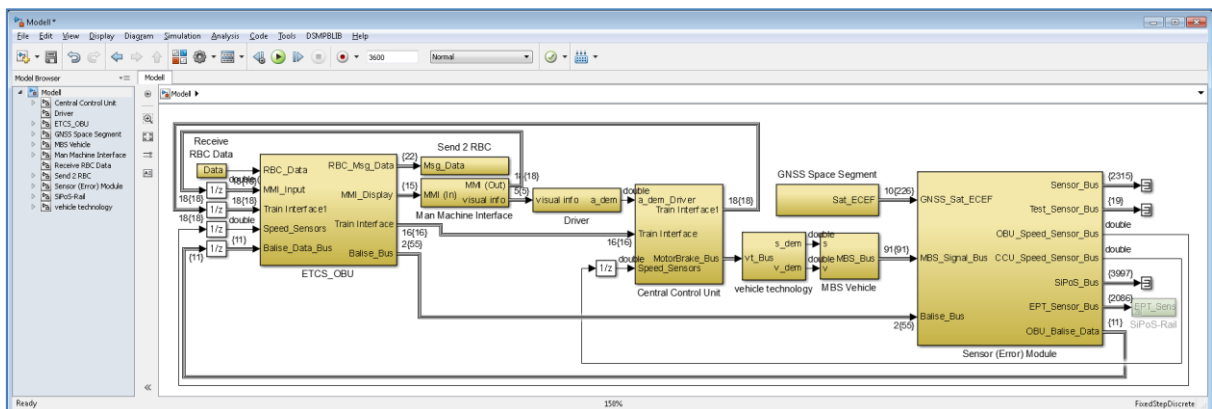


Abb. 86: Benutzeransicht des Simulink-Zentralmodells während der Simulation

In dem Simulink-Zentralmodell werden alle aktiven Programmteile der Simulation zusammengefügt. Der Informationsfluss der Module verläuft folgendermaßen:

Durch die ETCS-Streckenzentrale (ETCS-RBC) wird dem ETCS-Fahrzeugsteuergerät (ETCS-OBUE) eine Fahrtfreigabe mitgeteilt und eine streckenseitige Höchstgeschwindigkeit vorgegeben. Die Geschwindigkeit wird dem Fahrermodell (Driver) mit anderen Informationen über die ETCS- Triebfahrzeugführerschnittstelle (ETCS-Driver-Machine-Interface, ETCS-DMI) übergeben. Das Fahrermodell bestimmt aus der Soll- und der Ist-Geschwindigkeit einen Beschleunigungswunsch für das Zentralsteuergerät (Central Control Unit). Der Beschleunigungswunsch des Triebfahrzeugführers wird an die Fahrzeugtechnik (Vehicle Technology) weitergegeben, solange das

Signal nicht von einem Bremseneingriff des ETCS-Zugsicherungssystems (ETCS-Fahrzeugsteuergerät) übersteuert wird. Das Fahrzeugtechnik-Modul verwendet das lineare Bewegungsmodell nach Abschnitt 5.5.1, um aus einem Beschleunigungssignal die Geschwindigkeit und die Distanz zu berechnen. Im Modul „MBS Vehicle“ befindet sich die Schnittstelle zur SIMPACK-Mehrkörpersimulation. Das 5-Körper-Modell (Abschnitt 5.8.2.2) wird auf der Gleisachse durch das Distanzsignal des Fahrzeugtechnik-Moduls positioniert. Die Mehrkörpersimulation gibt die Sensordaten an das Simulink-Zentralmodell zurück.

In dieser Situation wartet die Szenariosteuerung, bis sich die Simulation des Simulink-Zentralmodells selbst beendet. Die (in MATLAB-Workspace-Variablen gespeicherten) Simulationsdaten des Simulink-Zentralmodells bleiben im MATLAB-Workspace erhalten.

Das Script „save_SimResults.m“ fasst die Simulationsdaten dieser Teilsimulation in einer MATLAB-Datenstruktur zusammen und speichert sie in einer MATLAB-Datei ab. Daran anschließend bereitet das Script „prepare_next_SimStep.m“ einen möglichen nächsten Simulationsschritt vor. Hiermit ist eine Teilsimulation abgeschlossen. In einer While-Schleife werden die Teilsimulationen solange wiederholt, bis das Ende des Fahrplanes erreicht ist.

Nachdem alle Teilsimulationen abgearbeitet sind, setzt das Script „PostProcessor.m“ die MATLAB-Dateien der Teilsimulationen zu einer vollständigen Datenstruktur „SimU“ zusammen. Die Messkanäle der Teilsimulationen werden aneinander gehangen. Alle in der Simulationsumgebung benutzten oder erzeugten Variablen werden in die Datenstruktur „SimU“ verschoben und als zentrale Datei mit allen Parametern und Ergebnissen dieses Simulationsdurchlaufes abgespeichert.

Alle Konfigurationsdaten, temporären Modelldateien und Ergebnisdateien werden in einem separaten Simulationsdatenverzeichnis für diesen Simulationsdurchlauf gespeichert. Alle temporären Daten im Verzeichnis „temp_config“ werden gelöscht. In einem letzten Schritt des Skriptes „SimU_start.m“ werden der Streckenatlas- und der Eisenbahninfrastruktur-Server beendet und die Simulationszeit berechnet.

Dieser Ablauf ist für jede Gesamtsimulation gleich. In der Konfiguration können jedoch die Szenarien und Modelle gewählt werden.

7.1.3 Verlauf des Simulationsszenarios

Nachdem die Simulationsumgebung den Initialisierungsprozess durchlaufen hat und das Simulink-Zentralmodell ausgeführt wird, ergibt sich in diesem Simulationsszenario während der Simulation folgender weiterer Verlauf:

Bereits zu Beginn der Simulation kann das ETCS-Fahrzeugsteuergerät (ETCS-OBUE) die erste Balise (NID-LRBG = 9) auslesen. Darauf basierend fordert das ETCS-Fahrzeugsteuergerät zu Beginn des Szenarios eine Fahrtfreigabe durch das Paket 132 „MA-Request“ von der ETCS-Streckenzentrale an. Bis zur Erteilung einer Fahrtfreigabe steht das Schienenfahrzeug an der Startposition an der Betriebsstelle „ocp_PCW_T1_Gerade1_Anfang“. Nach 0,2 Sekunden erhält das ETCS-Fahrzeugsteuergerät die Antwort in Form eines „Movement Authority“-Paketes mit einem Geschwindigkeitsprofil „Static Speed Profile“. Darin ist die streckenseitige Höchstgeschwindigkeit auf 80 km/h (22,2 m/s) festgelegt. In einer Entfernung von 2620 m ändert sich die streckenseitige Höchstgeschwindigkeit auf 40 km/h (11,1 m/s).

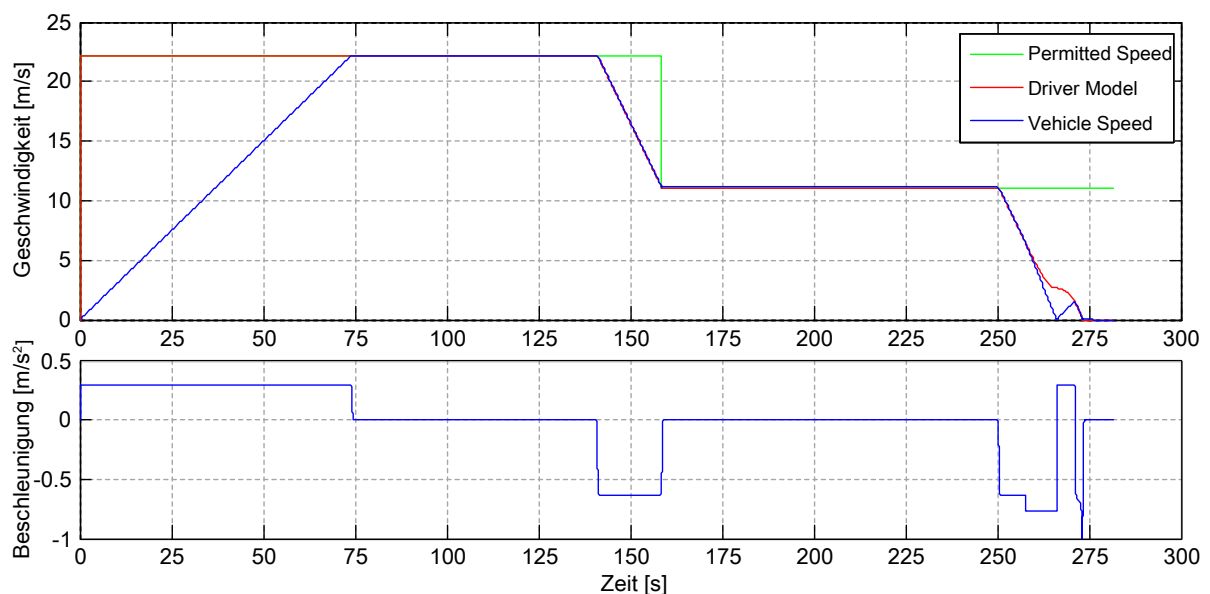


Abb. 87: Geschwindigkeitsverlauf (oben), Fahrzeugbeschleunigung (unten)

Dem Fahrermodell werden über die ETCS-Fahrerschnittstelle (ETCS-DMI) die zulässige Höchstgeschwindigkeit und die nächste Geschwindigkeitsänderung mitgeteilt. Das Fahrermodell interpretiert die zulässige Höchstgeschwindigkeit in der vorliegenden Implementierung als Sollgeschwindigkeit und gibt eine maximale Sollbeschleunigung von $0,3 \text{ m/s}^2$ an das Zentralsteuergerät aus. Der Geschwindigkeitsverlauf ist in Abb. 87 dargestellt. Am Zentralsteuergerät liegt keine Zwangsbremung durch das ETCS-Fahrzeugsteuergerät an, sodass der Beschleunigungswunsch an das Fahrzeugtechnikmodul weitergegeben wird. Das Fahrzeugtechnikmodul setzt die Sollbeschleunigung in einer eindimensionalen Bewegungsdifferentialgleichung mit

einer konzentrierten Schienenfahrzeugmasse in eine Geschwindigkeit und Distanz um. In der Mehrkörpersimulation wird die eindimensionale Bewegung der Schienenfahrzeugmasse in eine dreidimensionale Bewegung des Schienenfahrzeug-Mehrkörpermodells übersetzt. Die dreidimensionalen Bewegungsdaten werden im Sensormodul in physikalische und technische Sensorsignale gewandelt, die von den Steuergeräten wieder eingelesen werden.

Nach dem Simulationsstart erreicht das Fahrzeug die Sollgeschwindigkeit nach 74,5 Sekunden (830 m), sodass das Fahrermodell den Beschleunigungswunsch auf null reduziert. Das Fahrzeug fährt mit der Höchstgeschwindigkeit weiter. Nach 142 Sekunden (2329,6 m) nähert sich das Fahrzeug der Geschwindigkeitsreduzierung auf 40 km/h (11,1 m/s) und das Fahrermodell reduziert die Geschwindigkeit mit einer Bremsverzögerung von $0,7 \text{ m/s}^2$ nach einer Bremskurve mit der Betriebsbremse.

Im Folgenden wird die Geschwindigkeit von 40 km/h (11,1 m/s) konstant gehalten. Das ETCS-Fahrzeugsteuergerät gibt nun als nächste Geschwindigkeitsänderung den Zielpunkt auf der nördlichen Gerade mit einer Zielgeschwindigkeit von 0 km/h aus. Die Fahrtberechtigung endet hier. Auf der nördlichen Gerade bremst das Fahrzeug, um an dem im Fahrplan vorgegebenen Haltepunkt zum Stehen zu kommen. Durch die vom Fahrermodell vorgegebene Geschwindigkeitsreduzierung durch das Bremskurvenmodell (Abschnitt 5.5.2) verzögert das Fahrzeug in diese Situation jedoch zu langsam. Hierdurch werden die von dem ETCS-Fahrzeugsteuergerät berechneten Bremskurven zur Geschwindigkeitsüberwachung verletzt, sodass zuerst die Warnung einer Geschwindigkeitsüberwachung aktiviert wird. Im weiteren Verlauf wird auch die Bremskurve zur Auslösung einer Zwangs-Betriebsbremse verletzt und eine automatische Betriebsbremsung bis zum Stillstand ausgelöst. Nach dem Stillstand wird die Zwangsbremsung wieder deaktiviert und das Fahrermodell beschleunigt und bremst, um den Zielpunkt in minimaler Zeit zu erreichen.

In Abb. 88 (oben) ist die Bremsung von 40 km/h bis zum Stillstand mit einem Zwischenhalt durch die Zwangsbremsung im Detail dargestellt. In den zwei darunter liegenden Diagrammen sind die Zustandssignale der Bremskurven-Warnung und der Zwangsbremse mit Betriebsbremse (SB) gezeigt. Die Verletzung der Bremskurven-Warnung ist in Blau dargestellt. Im unteren Diagramm zeigt die durchgezogene Line (Magenta), dass eine Zwangsbremsung aktiviert wird. Die gestrichelte Magenta-Linie zeigt bis wann die Zwangsbremsung aktiviert bleibt.

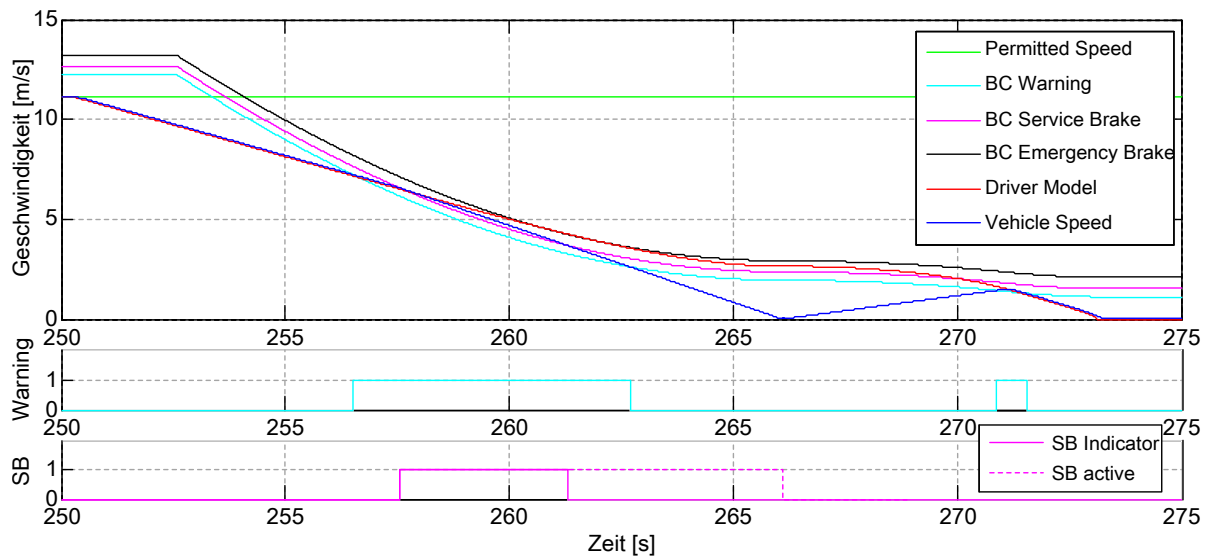


Abb. 88: Bremsung auf Null mit Bremskurven, unten: Zustand der Bremskurven-Warnung und Betriebsbremse (ServiceBrake, SB)

Abb. 89 zeigt die für das ETCS-System wesentlichen Informationen, d.h. die aktuelle Balisennummer (NID LRBG, Rot), die Distanz seit der Balisenüberfahrt (Blau) und die Distanz bis zur nächsten Geschwindigkeitsänderung (Grün). Die Änderung der ETCS-Eurobalisennummer (Rot) fällt mit der Nullung der Distanz seit der letzten ETCS-Eurobalisenüberfahrt (Blau) zusammen.

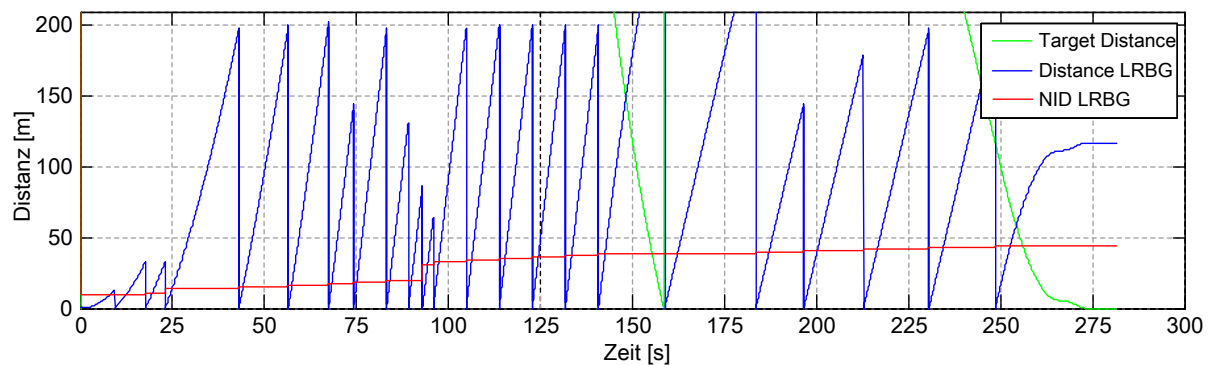


Abb. 89: Aktuelle ETCS-Eurobalisennummer (NID-LRBG, Rot), Distanz seit der Balisenüberfahrt (Blau) und Distanz bis zur nächsten Geschwindigkeitsänderung (Grün)

ETCS-Eurobalisengruppen werden in diesem Szenario immer zu Beginn eines Streckenelementes (Primitive) gesetzt, was zu unregelmäßigen Abständen zwischen den ETCS-Eurobalisen führt. Bei sehr langen Streckenelementen werden in regelmäßigen Abständen (hier 200 m) weitere ETCS-Eurobalisengruppen verlegt. In Grün ist der Abstand bis zur Geschwindigkeitsreduzierung auf 40 km/h und zum Endpunkt dargestellt.

7.1.4 Funktionalität des Streckenatlas-Servers

Der Streckenatlas-Server ist eine in Python geschriebene Serverapplikation, die zu Beginn des Simulationsablaufes automatisch durch die Szenariosteuerung (Abb. 85, Zeile 20) gestartet wird. Der Name der railML-Datei zur Konfiguration der Infrastrukturkomponenten und des Streckenatlas-Servers wird beim Start der Python-Anwendung durch die Szenariosteuerung in MATLAB als Startparameter mit übergeben. Der Server ist unter der URL: <http://localhost:8000> erreichbar.

```
header.begin
  data.type    = 3          ! File Format Type: 1/2/3 = .../.../x,y,z,u
  data.par(1)  = 1.0        ! UnitFactor = x,y,z[User] / x,y,z[SI]   ([m])
  data.par(4)  = 1          ! 0/1/2 = Superelev. about center/inner/outer Rail
  data.par(5)  = 1.506      ! Reference Length of Superelevation [m]
  data.par(7)  = 1          ! Increment for Data Reduction
header.end

! *** erzeugt vom SimU-Streckenatlas ***
! Ursprung ECEF:      (x0 ,y0,  z0) = (3989100.171, 434638.906,
4941250.022)
! Ursprung rotiert: (xr0,yr0,zr0) = (-21670.359, 798.555, -6365321.099)
! g-Vektor: (gx,gy,gz) = (0.000000, 0.000000, 9.810000)
!  x [m]      y [m]      z [m]      u [m]

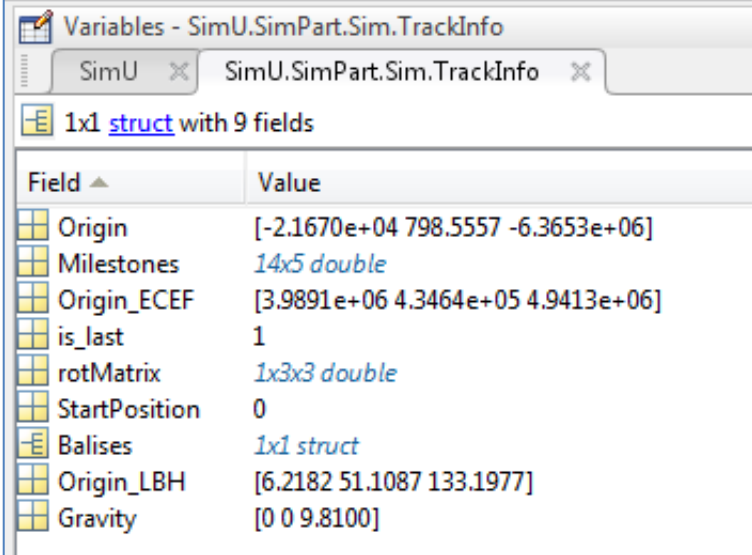
0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
2.092116 -3.940643 -0.000429 0.000000
4.184232 -7.881287 -0.000857 0.000000
6.276348 -11.821930 -0.001286 0.000000
...
521.771575 -879.779021 -0.085114 0.150000
523.549919 -881.314703 -0.085571 0.150000
525.333409 -882.844407 -0.086029 0.150000
...
```

Abb. 90: Auszug aus der SIMPACK-Streckendefinition, Datei „track.trm“

Zu Beginn jeder Teilsimulation wird im Skript „prepare_SimStep.m“ (Abb. 85, Zeile 22) eine SIMPACK-Streckendatei (Abb. 90) über die URL: <http://localhost:8000/simpack/milestone/0> vom Streckenatlas-Server abgerufen. Die Datei wird unter dem Namen „track.trm“ erstellt und ersetzt in der temporären Verzeichnisstruktur die Streckendefinition des SIMPACK-Modells.

Passend zur SIMPACK-Streckendatei wird die MATLAB-Datenstruktur „TrackInfo“ unter der URL: <http://localhost:8000/trackinfo/milestone/0> angefordert und direkt in den MATLAB-Workspace (Abb. 91) gespeichert. Mit der Variable „Origin“ und der Datenstruktur „rotMatrix“ lassen sich die lokalen Koordinaten der SIMPACK-Simulation in das ECEF-Koordinatensystem konvertieren. In der Datenstruktur „Milestones“ werden (in einem hier nicht verwendeten Konzept) weitere Wegmarken für die Repositionierung des Schienenfahrzeuges beim Übergang von Teilsimulationen

für die Simulationsumgebung erzeugt. Mit der Variable „StartPosition“ kann man die Startdistanz auf der Gleisachse für das Schienenfahrzeug festlegen. Die Variable „is_last“ zeigt an, ob die letzte (fahr-)planmäßige Teilsimulation befahren wird. Nach der letzten durchgeführten Teilsimulation wird die Szenariosteuerung mit dem Post-processing (Abb. 85, Zeile 55) fortfahren. In der Variable „Balises“ sind die ECEF-Koordinaten zu den ETCS-Eurobalisen enthalten.



The screenshot shows the MATLAB Variables window for the variable 'SimU.SimPart.Sim.TrackInfo'. It displays a 1x1 struct with 9 fields. The fields and their values are as follows:

Field	Value
Origin	$[-2.1670 \times 10^4 \ 798.5557 \ -6.3653 \times 10^6]$
Milestones	14x5 double
Origin_ECEF	$[3.9891 \times 10^6 \ 4.3464 \times 10^5 \ 4.9413 \times 10^6]$
is_last	1
rotMatrix	1x3x3 double
StartPosition	0
Balises	1x1 struct
Origin_LBH	$[6.2182 \ 51.1087 \ 133.1977]$
Gravity	$[0 \ 0 \ 9.8100]$

Abb. 91: MATLAB-Datenstruktur für Streckeninformationen (struct) „TrackInfo“

Mit dem dynamisch für jede Teilsimulation erzeugten Parametersatz werden das Simulink-Zentralmodell und die Mehrkörpersimulation konfiguriert.

7.1.5 Funktionalität der Eisenbahninfrastrukturkomponenten und des ETCS

Während der Simulation tauschen die ETCS-Streckenzentrale (ETCS-RBC) und das ETCS-Fahrzeugsteuergerät (ETCS-OBU) kontinuierlich und ereignisbasiert Daten in Form von ETCS-Botschaften über Ethernet-Pakete aus. Dieser Abschnitt beschreibt die Datenverarbeitung auf der Infrastrukturseite durch die ETCS-Streckenzentrale.

Abb. 92 stellt einen repräsentativen Auszug aus der Log-Datei der ETCS-Streckenzentrale dar. Anschließend werden dessen Daten analysiert. In dem Auszug aus dem Log der ETCS-Streckenzentrale ist die Verarbeitung zweier Kommunikationszyklen dargestellt.


```

(erster Kommunikationszyklus)
communication.py:56 parse message - empfangen Message 132 (MA Request)
communication.py:57 parse message - Rohdaten: (132, 21, 0, 1, 4, 0, 16,
1, 10, 0, 2, 2, 0, 0, 1, 20, 2, 2, 1, 3, 0)
communication.py:117 handle MA Request - LRBG=10, distance=0,
dir='Unknown'
models.py:103 get track pos - track = <PCW_T1_W1211_g1>, pos=2.0, dir=2
communication.py:143 handle MA Request - send SSP: [[-2, 80], [2589, 40]]
communication.py:147 handle MA Request - send MA: (V_LOA=0,
L_ENDSECTION=3704)
...
(zweiter Kommunikationszyklus)
communication.py:56 parse message - empfangen Message 132 (MA Request)
communication.py:57 parse message - Rohdaten: (132, 21, 0, 1, 4, 0, 16,...
communication.py:117 handle MA Request -
LRBG=10,distance=15,dir='Nominal'
models.py:103 get track pos - track = <PCW_T1_W1211_g1>, pos=17.0, dir=1
zuglenkung.py:41 detect ocp passage - train_track = <Track:
PCW_T1_W1211_g1>, train_pos = 17.0, train_speed = 4
zuglenkung.py:131 get route - ocpTT.ocpRef: <#ocp_PCW_T1_Gerade1_Anfang>
zuglenkung.py:196 get route - route_entries = [<TrackRef:
PCW_T1_W1211_g1>, <TrackRef: PCW_T1_W1211_g2>, <TrackRef:
PCW_T1_Gleis_120_Gerade_1>,...]
track.py:25 free track length -
(train_id, start_track, start_pos):(u'1234', <Track: PCW_T1_W1211_g1>,
2.0)
track.py:29 free track length - Route: [<TrackRef: PCW_T1_W1211_g1>,
<TrackRef: PCW_T1_W1211_g2>, <TrackRef: PCW_T1_Gleis_120_Gerade_1>,...]
track.py:49 free track length - next_ocpTT: <OcpTT: OcpTT #4>
track.py:69 free track length - ocp_stop in trackref <TrackRef:
<PCW_T1_Gleis_130_Gerade_3>, OCPpos = 517.101, distance = 3704.760
communication.py:143 handle MA Request - send SSP: [[-2, 80], [2589, 40]]
communication.py:147 handle MA Request - send MA: (V_LOA=0,
L_ENDSECTION=3704)
...

```

Abb. 92: Auszug aus der Log-Datei der ETCS-Streckenzentrale; fett: Dateiname:
Zeilennummer, unterstrichen: Funktionsname

In dem ersten Kommunikationszyklus wird die Botschaft „MA Request“ ereignisbasiert vom ETCS-Fahrzeugsteuergerät gesendet. Das Schienenfahrzeug überfährt die erste ETCS-Eurobalise der ETCS-Eurobalisengruppe 10 (LRBG=10). Dies ist die erste neue Balisengruppe, die das Fahrzeug ausliest. Daher ist dem Fahrzeug seine Bewegungsrichtung auf dem Gleis noch nicht bekannt (dir='Unknown'). Die ETCS-Streckenzentrale ordnet den Standpunkt der ETCS-Eurobalise der Primitive „track = <PCW_T1_W1211_g1>“ zu. Basierend auf dem Fahrplan und der vom Stellwerk freigegebenen Strecke werden das Geschwindigkeitsprofil (Static Speed Profile, SSP) und die Fahrtfreigabe (Movement Authority, MA) erstellt.

Das Geschwindigkeitsprofil besteht aus zwei Einträgen. Der erste Eintrag [-2,80] beschreibt, dass ab einer Distanz von 2 m vor der Balisenposition (Anfang der Gleisprimitive) eine Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h gilt. Der zweite Eintrag [2589, 40]

beschreibt, dass ab einer Distanz von 2589 m ab der Überfahrt über die erste ETCS-Eurobalise der aktuellen ETCS-Eurobalisengruppe (also diese Balise) eine Höchstgeschwindigkeit von 40 km/h gilt. Die Fahrtfreigabe ($V_{LOA} = 0$, $L_{ENDSECTION} = 3704$) endet in einem Abstand von 3704 m ab der Überfahrt über die erste ETCS-Eurobalise der aktuellen ETCS-Eurobalisengruppe (also dieser Balise) mit einer Entlassungsgeschwindigkeit von 0 km/h. Am Endpunkt der nördlichen Gerade soll das Schienenfahrzeug zum Stillstand kommen. Die Fahrtfreigabe (Movement Authority, MA) mit dem statischen Geschwindigkeitsprofil (Static Speed Profile, SSP) wird als eine ETCS-Botschaft von der ETCS-Streckenzentrale an das ETCS-Fahrzeugsteuergerät gesendet.

Der zweite Kommunikationszyklus wird durch die Botschaft „MA Request“ als eine zyklische Positionsmeldung vom ETCS-Fahrzeugsteuergerät an die ETCS-Streckenzentrale ausgelöst. Gleichzeitig wird eine Erneuerung der Fahrtfreigabe (Movement Authority) angefordert. Als Zykluszeit wird hier eine Sekunde verwendet. Die Position des Zuges wird durch die zuletzt überfahrene Balisengruppe ($LRBG=10$), die Richtung der Überfahrt ($dir='Nominal'$, d.h. in aufsteigender Zählrichtung der Balisen innerhalb der Balisengruppe) und der Distanz seit der Überfahrt der ersten Balise der aktuellen Balisengruppe ($distance=15$, [m]) eindeutig bestimmt. Mit diesen Parametern kann die ETCS-Streckenzentrale die Position des Schienenfahrzeuges auf dem Gleisnetz in Form der aktuell befahrenen Gleisprimitive (`<Track:PCW_T1_W1211_g1>`), der Position ($pos=17.0$, [m]) und der Richtung ($dir=1$, in aufsteigender Distanz) innerhalb der Primitive festlegen. Daraufhin fragt die ETCS-Streckenzentrale bei der Leitstelle (`zuglenkung.py`) die zu fahrende Route ab. Vom Stellwerk (`track.py`) wird die für diese Zugfahrt gestellte und gesicherte Fahrstraße abgerufen. Die freie Streckenlänge ab der aktuellen Balisenposition wird aus dem Fahrplan (Anhang B.7) und dem Zustand der Betriebsstellen berechnet. Die nächste auf Halt (`ocp_stop`) stehende Betriebsstelle (OCP) ist `<OcpTT: OcpTT #4>`, die sich an der Position $OCPpos=517.101$ [m] auf der Primitive `<PCW_T1_Gleis_130_Gerade_3>` befindet. Das Schienenfahrzeug hat eine freigegebene Streckenlänge seit der letzten Balisenüberfahrt von $distance=3704.760$ [m]. Aus diesen Informationen erstellt die ETCS-Streckenzentrale eine ETCS-Fahrtfreigabe-Botschaft („Movement Authority“-Paket) mit statischen Geschwindigkeitsprofil („Static Speed Profile“-Paket) und sendet sie an das ETCS-Fahrzeugsteuergerät auf dem Schienenfahrzeug.

7.1.6 Analyse der Wiederholungsgenauigkeit

Durch den verteilten Aufbau der Simulationsumgebung, die Kopplung verschiedener Simulationsprogramme und die nicht zeitschrittgenaue Übertragung der ETCS-Botschaften soll in diesem Abschnitt die Streuung der Simulationsergebnisse an repräsentativen Signalen untersucht werden. Die in Abschnitt 7.1.1 dargestellte Simulationsszenario wird hierfür zehnmal durchgeführt und die Simulationsergebnisse gespeichert. Im Folgenden werden die Differenzen der Simulationen diskutiert.

Die Ethernetkommunikation zwischen dem ETCS-Streckenzentrale (als Python-Server) und dem ETCS-Fahrzeugsteuergerät (im Simulink-Zentralmodell) führt zu einem beobachteten Jitter der im Simulink empfangenen ETCS-Botschaften von 50 *Millisekunden* ($50\text{ ms} = 0,050\text{ s}$). Die Implementierung des ETCS-Fahrzeugsteuergerätes erzeugt an den Schnittstellen des Moduls „ETCS Onboard Unit“ distanzabhängige Signale, an denen keine Zeit- oder Werteveränderungen beobachtet werden.

Alle Signale des Simulink-Zentralmodells (ausgenommen der ereignisgesteuerte Teil des ETCS-Fahrzeugsteuergerätes) und der gekoppelten SIMPACK-Mehrkörpersimulation sind deterministisch. Zeit- und Werteveränderungen wurden nicht beobachtet.

7.1.7 Performanceparameter der Simulationsumgebung

Die Simulationsumgebung wurde auf einem Computer mit den in Anhang B.1 beschriebenen Eigenschaften entwickelt. Alle Simulationen wurden auf diesem System ausgeführt. Zur Abschätzung der Simulationsgeschwindigkeit sei hier die Simulationszeit als ein üblicher Parameter dokumentiert.

Auf diesem System wurde die Simulation aus Abschnitt 6.1 und aus Abschnitt 7.1.1 durchgeführt. Die Simulationszeiten werden in die reine Simulationszeit und die Konfigurations- und Auswertezeit aufgeteilt.

Die Testfahrtsimulation zur Validierung der Simulationsumgebung in Abschnitt 6.1 dauerte 380 Simulationssekunden. Dafür wurde das Simulink-Modell 1732 Realzeitsekunden lang ausgeführt. Dies entspricht einem Realzeitfaktor von 4,55 Realzeitsekunden pro Simulationssekunde. Zur Vorbereitung der Simulation benötigt die Simulationsumgebung 59 Realzeitsekunden. Nach der Simulink-Simulation wurden die Simulationsdaten in 74 Realzeitsekunden nachbearbeitet und abgespeichert. Insgesamt dauert ein Simulationsdurchlauf 1865 Realzeitsekunden.

Das zweite Simulationsszenario aus Abschnitt 7.1.1 hat eine Simulationszeit von 280 Simulationssekunden. Das Simulinkmodell wird in 1274 Realzeitsekunden ausgeführt. Dies entspricht einem Realzeitfaktor von 4,0 Realzeitsekunden pro Simulations-

sekunde. Die Konfigurationszeit vor der Simulinksimulation beträgt 27 Realzeitsekunden. Die Auswertzeit mit Speicherung der Simulationsergebnisse beträgt 57 Realzeitsekunden. Insgesamt benötigt eine Simulation 1357 Realzeitsekunden.

7.2 Analyse der Sensoriksimulation und des Sensor-Fehler-Moduls

In Abschnitt 5.9 wird die allgemeine Modellstruktur der Sensorikmodelle in der Simulationsumgebung eingeführt. Die folgenden Abschnitte wenden die Modellstruktur an konkreten Bewegungssensoren für alle Sensorgruppen an. Die Sensormodelle sind grafisch in Simulink implementiert und befinden sich im Sensormodul (Abb. 30 und Abb. 86, Subsystem „Sensor (Error) Module“) des Simulink-Zentralmodells. Simulink speichert die erzeugten Sensorsignale als MATLAB-Workspace-Variablen nach der Simulation ab. Sensormodelle sind nach ihren physikalischen und technischen Eigenschaften in je drei Teilmodelle strukturiert: Sensormodell, Störungsmodell und Fehlermodell. Die Funktionalität und Eigenschaften eines Sensors sind in diese Untermodelle verteilt.

In den folgenden Abschnitten werden die Simulationsergebnisse der Sensormodelle mit der gewählten Konfiguration vorgestellt. Sensoren der eindimensionalen Bewegungssensorik sind Radimpulsgeber. Die Verarbeitungsstufen ihrer Signale werden in Abschnitt 7.2.1 beschrieben. Abschnitt 7.2.2 zeigt das Verhalten und die Zustände des ETCS-Eurobalisen-Simulators als distanzbasierte Wegmarkensensorik. Die RFID-Wegmarkensensorik als positionsbasierte Wegmarkensensorik stellt Abschnitt 7.2.3 vor. Das simulierte Verhalten eines funktionalen Satellitennavigationsempfängers als dreidimensionale Bewegungssensorik auf dem Schienenfahrzeug stellt Abschnitt 7.2.4 vor. Die dreidimensionalen Änderungen der Schienenfahrzeugbewegung werden im Sensormodell eines Inertialsensors (IMU) in Abschnitt 7.2.5 gemessen.

Auch in diesem Abschnitt wird das in Abschnitt 7.1 beschriebene Simulationsszenario genutzt. Die simulierten Sensorsignale zeigen weitere Details dieses Szenarios.

7.2.1 Radimpulsgeber (Eindimensionale Bewegungssensorik)

Das Sensorprinzip eines Radimpulsgebers als Geschwindigkeits- und Distanzsensor wird in Abschnitt 2.4.1 vorgestellt. Anhang A.5.3 zeigt den Sensor am Referenzfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“. Das Sensormodell des Radimpulsgebers beschreibt Abschnitt 5.10.1. Die folgenden Abschnitte stellen die Simulationsergebnisse des Radimpulsgeber-Sensormodells vor. Dazu wird das Modell nach Abschnitt 5.9 aufgeteilt und schrittweise entwickelt.

7.2.1.1 Sensor-Physikmodell und Physik-Störungsmodell

Im Sensor-Physikmodell wird das ideale physikalisch messbare Sensorsignal erzeugt. In diesem Modell hat das 5-Körper-Modell eine ideale Verbindung zum Fahrweg. Aus dem Distanzsignal des Drehgestells wird ein Radsatz-Umdrehungswinkel φ_{Rad} und aus der Geschwindigkeit v_{Fzg} (Abb. 87) eine Winkelgeschwindigkeit des Radsatzes $\omega_{Radsatz,ideal}$ berechnet. Der Wertebereich des Radsatz-Umdrehungswinkels φ_{Rad} ist auf eine Umdrehung ($1U = 2\pi rad$) beschränkt. Abb. 93 zeigt den Beginn des Szenarios mit einer konstanten Beschleunigung des Schienenfahrzeuges.

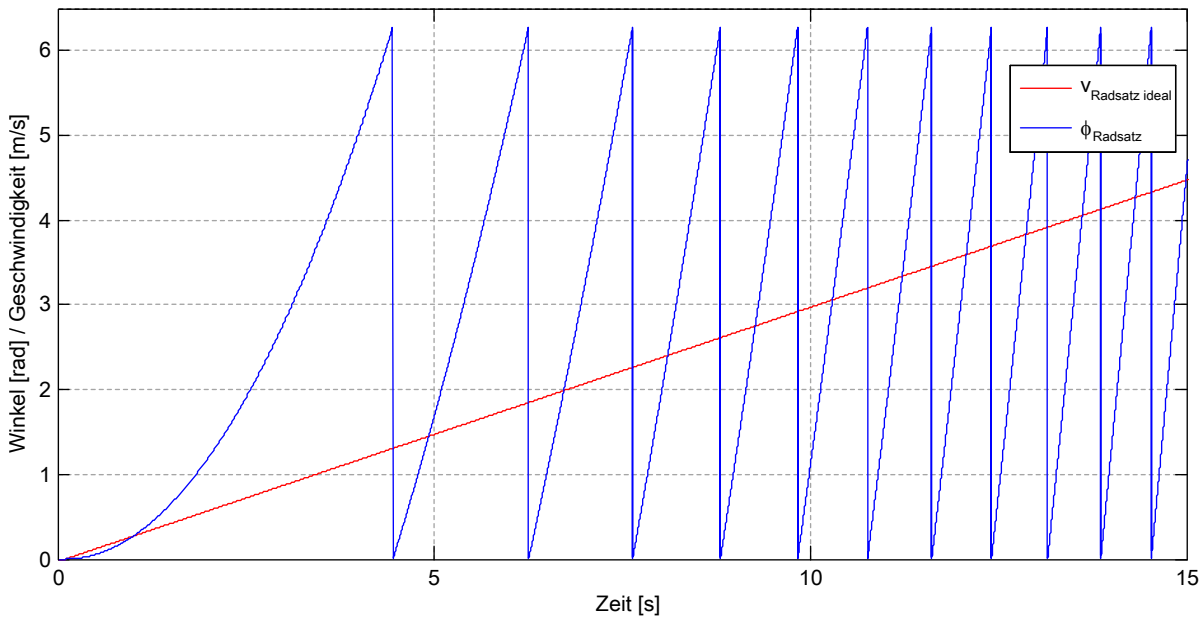


Abb. 93: Radsatz-Umdrehungswinkel und Fahrzeug-Geschwindigkeit bei beschleunigter Bewegung am Startpunkt

In Abb. 94 sind die ideale Winkelgeschwindigkeit des idealen Radsatzes $\omega_{Radsatz,ideal}$ (blau) und des schlupfbehafteten Radsatzes ω_u (rot) dargestellt. Im Physik-Störungsmodell wird der Schlupf als eine physikalische Störung des Radsatzes berechnet. Der Schlupf wurde zur besseren Darstellung mit $s_{const} = 0,3$ auf einen unrealistisch hohen Wert gesetzt. Für dieses Szenario wurden die maximale Fahrzeugbeschleunigung von $a_{maxMotor} = 0,3 m/s^2$ und eine maximale Verzögerung von $a_{maxBremsen} = -0,7 m/s^2$ (Abb. 87) gewählt.

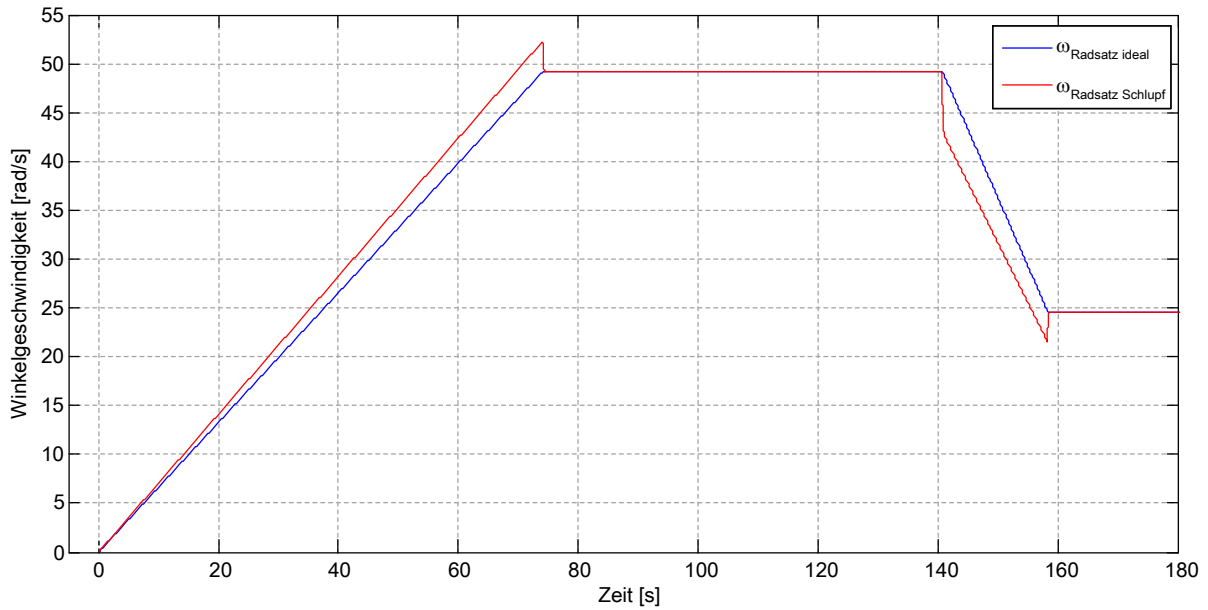


Abb. 94: Winkelgeschwindigkeit des idealen und des schlupfbehafteten Radsatzes

Der hier berechnete Schlupf im Sensormodell hat keine Verbindung zum eindimensionalen Bewegungsmodell der Fahrzeugtechnik. Ein Physik-Fehlermodell wurde zur Vollständigkeit als Submodell angelegt. Es wurde aber kein Fehlermodell implementiert.

7.2.1.2 Sensor-Technikmodell und Technik-Störungsmodell

Nachdem das physikalisch ideale, gestörte und fehlerbehaftete Sensorsignal erstellt wurde, wird im zweiten Teil des Sensormodells das technisch abgegebene Sensorsignal der technischen (elektrischen) Schnittstelle erzeugt. Die Radsatzdrehung wird technisch auf eine Kodierscheibe mit $n_{KS} = 80$ radial angeordneten (Zahnrad-)Zähnen übertragen. Der effektive Rollradius der Räder des Radsatzes wird mit $r_{Rad} = 0,452 \text{ m}$ angenommen. Daraus ergibt sich der effektiv abrollende Radumfang von $U_{Rad} = 2,84 \text{ m}$.

Der kontinuierliche Radsatzwinkel φ_{ges} wird in eine zeit- und wertekontinuierliche Zahnanzahl n_{ges} umgerechnet. Erreicht das Zahnanzahlsignal n_{ges} ein neues Inkrement, dann wird dies als Trigger für die Auslesung einer neuen steigenden Zahnflanke des Rechtecksignals interpretiert.

Die kontinuierliche Radsatz-Rotationsgeschwindigkeit ω_u wird in eine kontinuierliche Zahnflanken-Pulsfrequenz f_{RIG} umgerechnet. In Abb. 95 ist in Schwarz die ideale zeit- und wertekontinuierliche Pulsfrequenz f_{RIG} eingezeichnet. An den Zeitpunkten, wenn eine steigende Flanke erkannt wird (Inkrement des Zahnanzahlsignal n_{ges}), wird das blaue Signal der diskreten Pulsfrequenz $f_{RIG \text{ diskret}}$ mit der ideale Pulsfrequenz (f_{RIG} , schwarz) wertekontinuierlich und zeitdiskret aktualisiert.

Reale Messanordnungen bestimmen die Pulsfrequenz aus dem zeitlichen Abstand zwischen zwei Flanken. Dadurch entsteht eine zeitliche Mittelung der Winkelgeschwindigkeit zwischen den zwei Flankenzeitpunkten. Dieses Verhalten wird durch die gemittelte Pulsfrequenz $f_{RIG\,diskret,verzögert}$ nachgebildet, indem zu jedem Flankenzeitpunkt das Frequenzsignal des vergangenen Flankenzeitpunktes und des aktuellen Flankenzeitpunktes gemittelt wird. Dadurch ist dieses Signal der wahren Winkelgeschwindigkeit bzw. Pulsfrequenz verzögert.

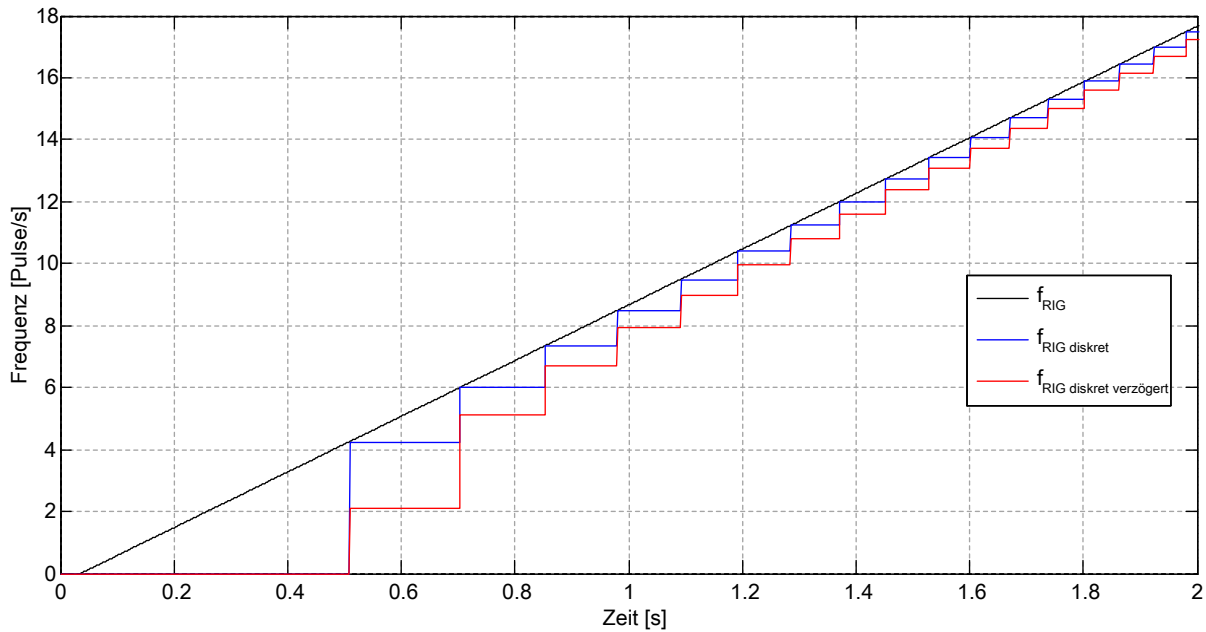


Abb. 95: Ideale kontinuierliche und zeit- und wertediskrete Pulsfrequenz des Radimpulsgebers

Systematische und stochastische Störungen auf das Sensorsignal werden vereinfacht als unabhängiges und geschwindigkeitsabhängiges weißes Messrauschen auf das zeit- und wertekontinuierliche Pulsfrequenzsignal f_{RIG} aufgeprägt. Die Zeitdiskretisierung der idealen Pulsfrequenz f_{RIG} in Abb. 95 wird identisch auf die verrauschte Pulsfrequenz $f_{RIG\,rausch}$ in Abb. 96 angewendet.

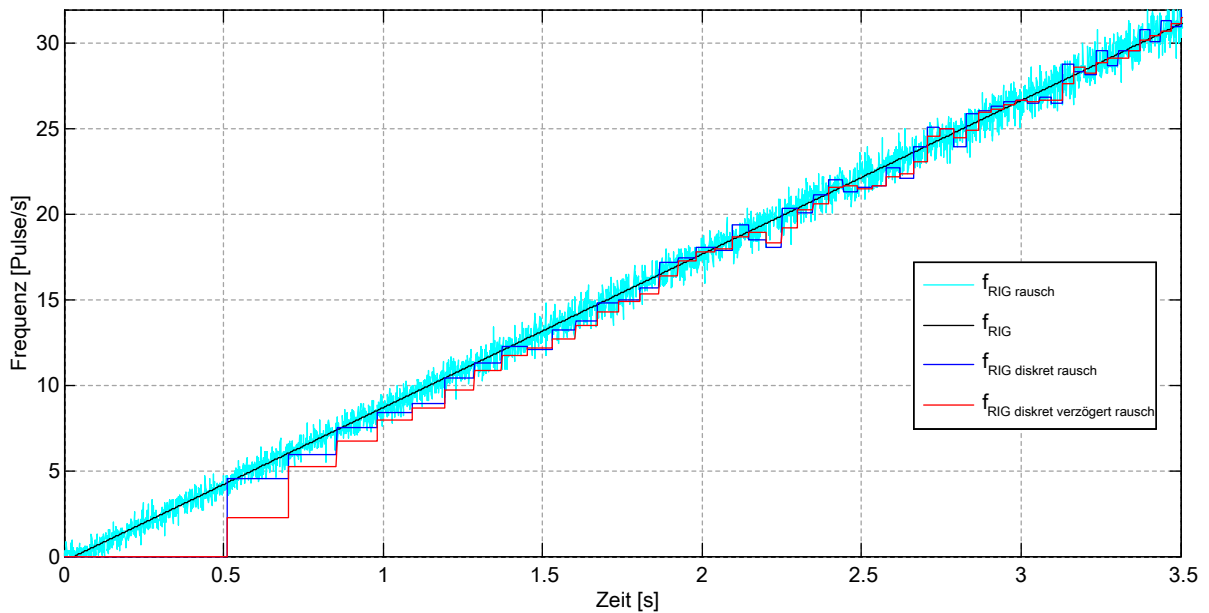


Abb. 96: Verrauschte kontinuierliche und diskrete Pulsfrequenz des Radimpulsgebers
Daraus ergibt sich ein realistisches Pulsfrequenzsignal $f_{RIG \text{ diskret verzögert rausch}}$, wie es auf dem Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ in der Realität beobachtet wird.

7.2.1.3 Technik-Fehlermodell

An das Technik-Störungsmodell schließt sich das Technik-Fehlermodell an, das dem Sensorsignal technische Ausfälle und Fehlersituationen aufgeprägt.

In Abb. 98 ist eine komplexe Fehlersituation dargestellt. Der Sensor funktioniert im Geschwindigkeitsbereich $v_{Fzg} \leq 15 \text{ m/s}$ fehlerfrei. Oberhalb der Geschwindigkeit wird jede zweite steigende Flanke ignoriert, und die gemessene Pulsfrequenz halbiert sich. Zusätzlich fällt der Sensor in Intervallen von 15 Sekunden für 4 Sekunden vollständig aus. Nach 200 Sekunden fällt der Sensor für den Rest der Messung aus und gibt eine konstante Pulsfrequenz von $100 \text{ Pulse/s} \triangleq v_u = 7,85 \text{ m/s}$ aus.

Für diese Fehlersituation gibt es folgende Fehlerzustände:

F0 – kein Fehler

F1 – halbe Pulsfrequenz (FMEA: 4.4.7)

F2 – vollständiger Ausfall, Pulsfrequenz ist null (FMEA: 4.1.9)

F3 – vollständiger Ausfall, Pulsfrequenz hat konstanten Wert (FMEA: 4.2.1)

In Klammern ist die Referenz des Fehlerzustandes in der FMEA (siehe Anhang D.1) angegeben. Die Fehlersituationen sind als „Enabled Subsystems“ in Simulink (Abb. 97) implementiert. Eine konfigurierbare Logik kann die Subsysteme selektiv einschalten. Dabei wird geschwindigkeitsabhängig von der ersten zum zweiten Fehlerzustand

umgeschaltet. Der dritte und vierte Fehlerzustand wird zeitabhängig und mit höherer Priorität als der zweite Fehlerzustand eingeschaltet.

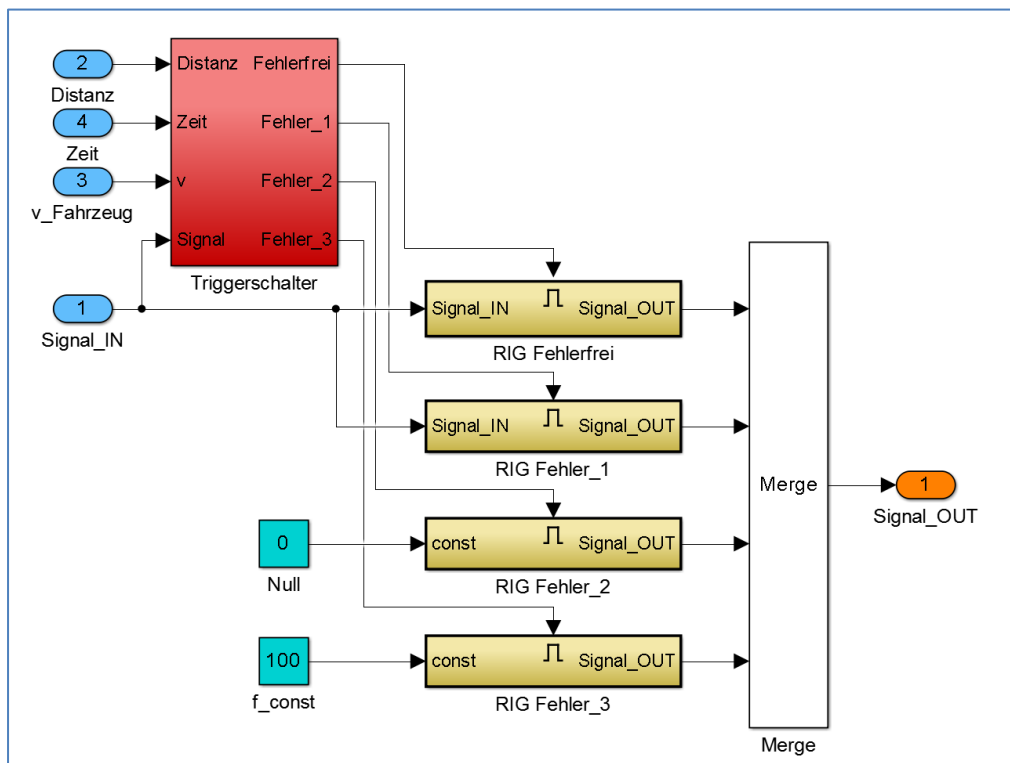


Abb. 97: Simulink-Technik-Fehlermodell des Radimpulsgebers

Daraus ergibt sich in Abb. 98 folgendes Geschwindigkeitssignal:

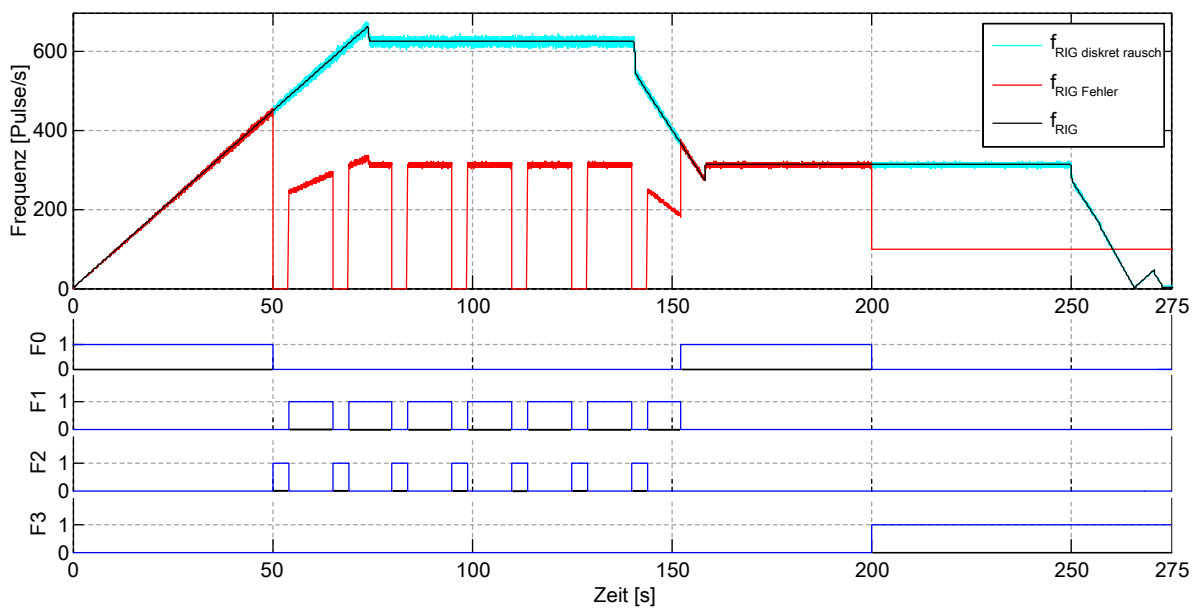


Abb. 98: Pulsfrequenz des Radimpulsgebermodells (oben), Fehlerzustände F0..F3 (unten)

Im oberen Diagramm ist in Schwarz die ideale Pulsfrequenz f_{RIG} und in Cyan die verrauschte werte- und zeitdiskrete Pulsfrequenz $f_{RIG,diskret,rausch}$ aufgetragen. In Rot ist die durch das Fehlermodell beeinflusste werte- und zeitdiskrete Pulsfrequenz $f_{RIG,Fehler}$ dargestellt. Die Aktivierung der Fehlerzustände F0 bis F3 ist in den unteren Diagrammen in Abb. 98 dokumentiert.

7.2.2 ETCS-Eurobalisen-Simulator (Distanzbasierte Wegmarken)

Die Positionen von ETCS-Eurobalisen sind im Sensormodell nach Abschnitt 5.11.1 als Distanz ab dem Startpunkt der Gleisachse definiert. Während des Szenarios bewegt sich das Schienenfahrzeug auf der Gleisachse und passiert nacheinander die festen Distanzen der ETCS-Eurobalisen. In Abb. 84 sind die Positionen der automatisiert erstellten ETCS-Eurobalisengruppen als Fahnen dargestellt. Die Identifikationsnummer NID ist neben der Fahne mit einem vorangestellten „B“ (für Balise) eingezeichnet. Abb. 99 zeigt die aufbereiteten Simulationsergebnisse des Modells. Im oberen Teil des Diagramms sind die konstanten Abstände der ETCS-Eurobalisen vom Startpunkt auf der Gleisachse als waagerechte blaue Distanzen eingezeichnet. In Rot ist die Distanz des Balisenlesegerätes auf der Gleisachse dargestellt.

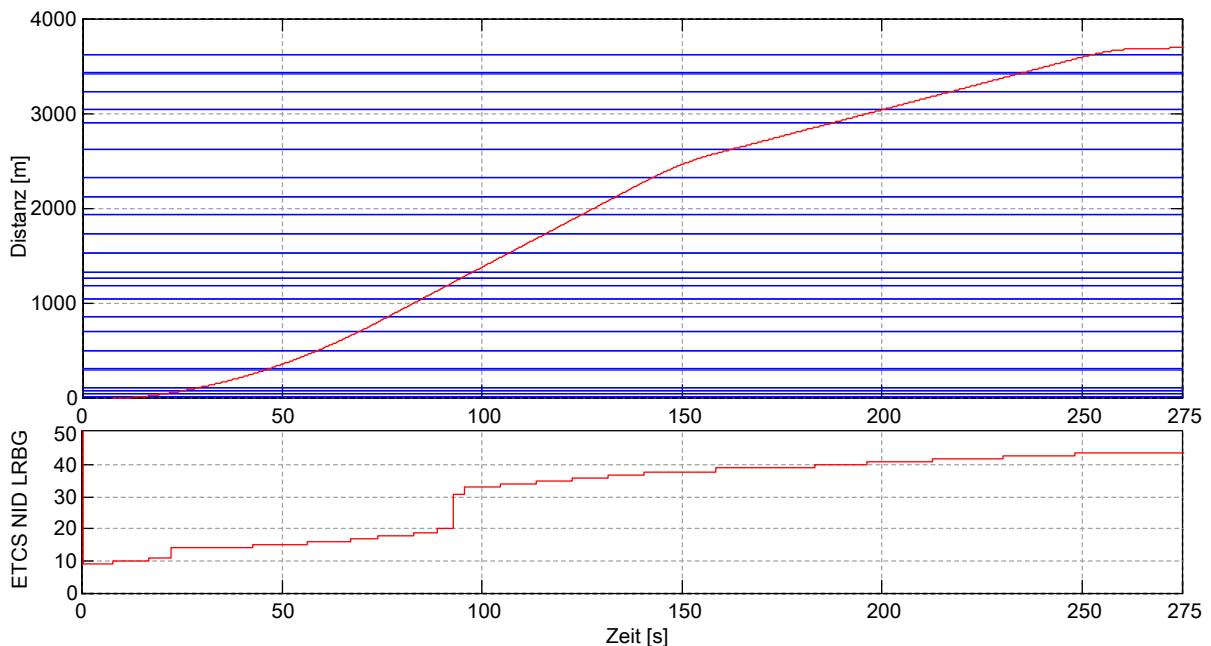


Abb. 99: Distanzen der ETCS-Eurobalisen (Blau) und Balisenempfänger (Rot) auf Gleisachse (oben), aktuelle ETCS-Eurobalisen NID (unten)

Ist die Distanz des ETCS-Balisenlesegerätes auf der Gleisachse größer als die Distanz einer ETCS-Eurobalise, dann wird dies als Auslesung einer neuen ETCS-Eurobalise interpretiert. Dieses Verhalten entspricht dem Sensor-Physikmodell aus Abschnitt 5.11.2. In dem Sensor-Technikmodell wird nach einer Auslesung die neue

NID der ETCS-Eurobalise vom Balisenlesegerät ausgegeben (siehe Abb. 99 unten). Die Distanz seit einer Auslesung ist bereits in Abb. 89 in Blau dargestellt.

Vor der Simulink-Simulation lädt die Szenariosteuerung die Szenariokonfiguration vom Gleisatlas-Server. Das Simulink-Zentralmodell übernimmt zu Simulationsbeginn die verwendeten Variablen aus dem MATLAB-Workspace. In der Variable „Balises“ (Abb. 91) ist der Dateninhalt der Balisen abgelegt. In dem Sensormodell werden die Daten der zuletzt überfahrenen ETCS-Eurobalise aus der Datenstruktur ausgelesen und im folgenden Simulationsschritt als aktuellster ETCS-Eurobalisen-Datensatz an das ETCS-Fahrzeugsteuergerät weitergegeben.

Im ersten Abtastschritt wurde noch keine ETCS-Eurobalise eingelesen, sodass das Balisenlesegerät den festgelegten Wert $NID = 16777215$ ausgibt. Im zweiten Abtastschritt wird die erste eingelesene ETCS-Eurobalise mit der $NID = 9$ eingelesen. Der vollständige Datensatz einer ETCS-Festdatenbalise nach SUBSET-026 Abschnitt 8.4.2.1 wird als funktionale Datenstruktur angegeben, wie in Abb. 40 dargestellt.

7.2.3 RFID-Wegmarkensensorik (Wegmarken mit 3D-Position)

An beiden Fahrzeugspitzen des 5-Körper-Modells befinden sich je zwei Marker für die Antennenposition von RFID-Empfängern. Ein Marker beschreibt den Einbauort der Antenne. Der zweite Marker befindet sich senkrecht unter dem Antennenmarker auf Schienenkopfhöhe. Beide Marker sind am Wagenkastenkörper im Wagenkasten-Koordinatensystem definiert und weisen die in Abschnitt 5.11.3.2 beschriebenen Störungen auf.

Das folgende Szenario konzentriert sich auf einen RFID-Empfänger (SimU RFID FR1), dessen Marker an der Spitze des Schienenfahrzeuges in Fahrtrichtung FR1 angebracht ist (Abb. 61). Die Mess- und Simulationsergebnisse sind zu dem zweiten Sensor (SimU RFID FR2) äquivalent.

Abb. 100 zeigt die im ECEF-Koordinatensystem gemessenen dreidimensionalen Abstände zwischen dem RFID-Marker auf Schienenkopfhöhe und allen Wegmarkenpositionen (Abb. 76) während dem in Abschnitt 7.1.1 beschriebenen Szenario. Der Abstand zu jeder Wegmarke während der $\frac{3}{4}$ Umrundung des Teststrings T1 nimmt einmal ein Minimum von nahe null an. Dies sind die Zeitpunkte, an denen die Antenne des RFID-Lesegerätes auf dem Schienenfahrzeug die Wegmarke passiert.

Die Wegmarke 9 befindet sich am Ende der nördlichen Gerade (Abb. 78, Abb. 79, Abb. 84, wo kurz danach auch die Testfahrt endet). Deren Abstand zum RFID-Marker zeigt einen charakteristischen Verlauf. Der minimale Abstand zur Wegmarke ist nach rund 255 Sekunden. Zu Beginn der Testfahrt (0s..50s) befährt das Fahrzeug die südliche Gerade und der Abstand steigt nur langsam an. Im NO-Bogen wird der

Abstand zur Wegmarke maximal (50s...100s) bevor er wieder kleiner wird (100s...250s). Da das Fahrzeug im zweiten Teil der Testfahrt die Geschwindigkeit von 80km/h auf 40km/h reduziert, dauert der zweite Teil länger.

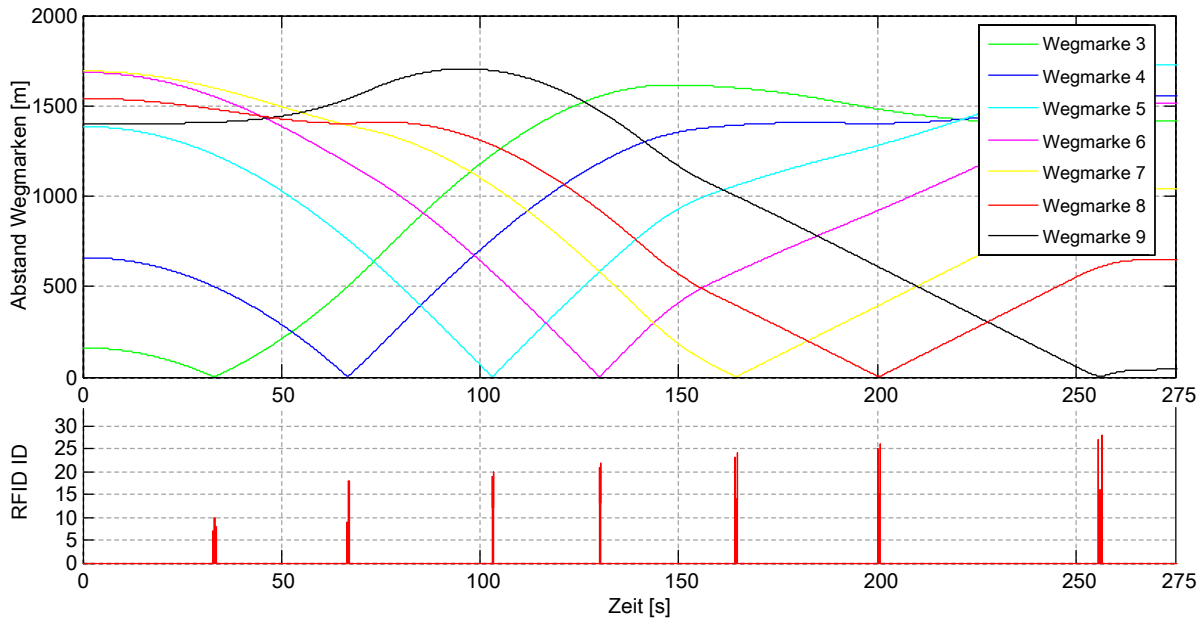


Abb. 100: Geometrischer Abstand (3D) zwischen Wegmarkenpositionen und dem RFID-Empfängermarker auf Schienenkopfhöhe (oben), ausgelesene RFID-Tag-IDs der Wegmarken (unten)

Die Wegmarken 1, 2 und 10 befinden sich auf dem südöstlichen Streckenstück des Teststrings T1, das in diesem Szenario nicht befahren wird. Da dieser Streckenbereich vom Streckenatlas nicht generiert wurde, sind für diese Wegmarken auch keine Signale verfügbar.

Im Sensor-Technikmodell (Abschnitt 5.11.3.4) und dem darauf aufbauenden Technik-Störungsmodell (Abschnitt 5.11.3.5) werden die geometrischen Abstände zwischen Wegmarke und RFID-Empfänger in auslesbare, technische Signale des RFID-Empfängers umgewandelt. In den beiden Teilen von Abb. 101 sind die technischen Signale ID und RSSI an der Wegmarke 8 dargestellt. An der Wegmarke sind drei RFID-Tags verlegt. Der RFID-Transponder mit der ID=15 ist auf der Hauptwegmarke (Anhang A.7.4) angebracht, für die eine Geokoordinate bekannt ist. Die Positionen der zwei Hilfswegmarken vor und hinter der Hauptwegmarke sind durch ihren Abstand auf der Gleisachse zur Hauptwegmarke näherungsweise bekannt (Abb. 81).

Der obere Teil von Abb. 101 zeigt die RFID-Signale über der Kilometrierung der Gleisachse des Teststrings T1. So lassen sich die stationären Eigenschaften der Gleisachse, z.B. Wegmarken, mit verschiedenen Simulationsergebnissen und realen Messungen in einem einheitlichen Bezugssystem (Kilometrierung) vergleichen. In

Blau ist die Auslesung der Wegmarke 8 während der Testfahrt des Versuchsfahrzeuges „IFS-Erprobungsträger 1“ aus Abschnitt 6.1 eingezeichnet. In Schwarz ist die ideale Signalstärke des RFID-Modells in dem Szenario aus Abschnitt 7.1.1 dargestellt. In Rot ist die mit einer Taktzeit von 8ms diskretisierte und um 5ms verzögerte Signalstärke des RFID-Modells eingezeichnet.

Das Schienenfahrzeug in der Simulationsumgebung ist in aufsteigender Kilometrierung gefahren, da der RSSI-Wert (Rot) in aufsteigender Kilometrierung gehalten wird. Aus dem Signalverlauf des IFS-Erprobungsträgers ist zu erkennen, dass es in absteigende Kilometrierung gefahren ist.

Die Signalstärke von RFID-Empfängern zeigt sehr unförmige Peakformen während einer Überfahrt über einen RFID-Tag. Dies wurde durch ein Modell der Signalförmigkeit in Abhängigkeit vom Abstand zur Hauptwegmarke und einem zeitverzögerten weißen Rauschen nachgebildet.

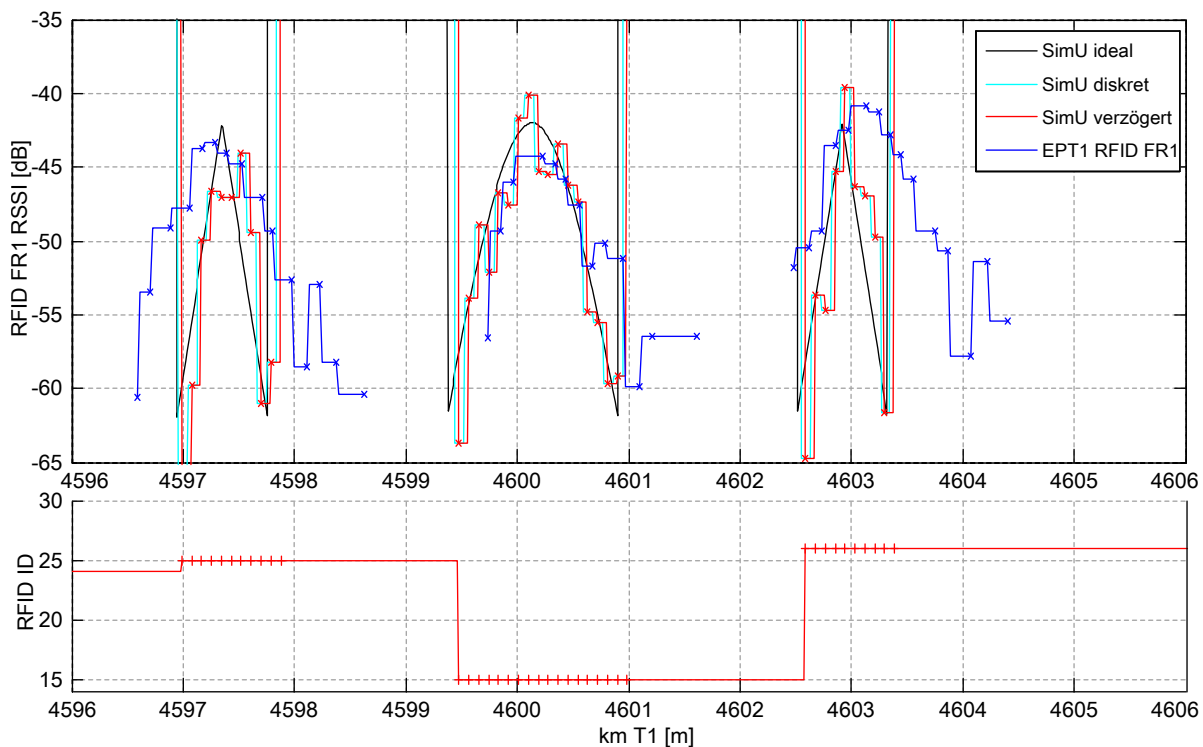


Abb. 101: RFID-Signale RSSI und ID an Wegmarke 8

In Abb. 101 (unten) ist die Tag-ID eingezeichnet. Mit Kreuzen sind die verzögerten Auslesezeitpunkte (äquivalent zur verrauschten und verzögerten Signalstärke RSSI (Rot) in Abb. 101 (oben)) markiert. Nach einer Auslesung wird die zuletzt ausgelesene Tag-ID bis zur Auslesung einer neuen Tag-ID gehalten. Eine fehlerhafte Veränderung der Tag-ID wurde für dieses Szenario nicht angenommen.

7.2.4 Satellitennavigation-Benutzersegment (3D-Bewegungssensorik)

In diesem Abschnitt werden die Simulationsergebnisse der funktionalen Modellierung eines GNSS-Positionssensors nach Abschnitt 5.12.1 dargestellt. Der GNSS-FR1 Positionssensor befindet sich im 5-Körper-Modell der Simulationsumgebung (und auf dem Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“) an der Spitze des Schienenfahrzeuges in Fahrtrichtung FR1 (Anhang A.11.1). In Abb. 81 ist der Sensor in einer Gesamt-übersicht der geometrischen Verhältnisse an dem betrachteten Fahrzeugmodell in der südöstlichen Ecke des Diagramms eingezeichnet.

Die Position des GNSS-Sensors wurde in der Mehrkörpersimulation an einem Marker auf dem Wagenkastenkörper gemessen. Der Marker ist im Wagenkasten-Koordinatensystem definiert. Seine Position wird während der Simulation im SIMPACK-Umgebungskoordinatensystem gemessen. Die Positionen werden im Simulink-Zentralmodell aus dem SIMPACK-Koordinatensystem in das ECEF-Koordinatensystem transformiert. In Abb. 102 sind die Antennenposition des GNSS-FR1 Physik-Sensormodells auf der simulierten Testfahrt nach Abschnitt 7.1.1 als geografische Koordinaten (Breitengrad, Längengrad) sowie die ellipsoidischen Höhe im WGS84-Datum eingezeichnet.

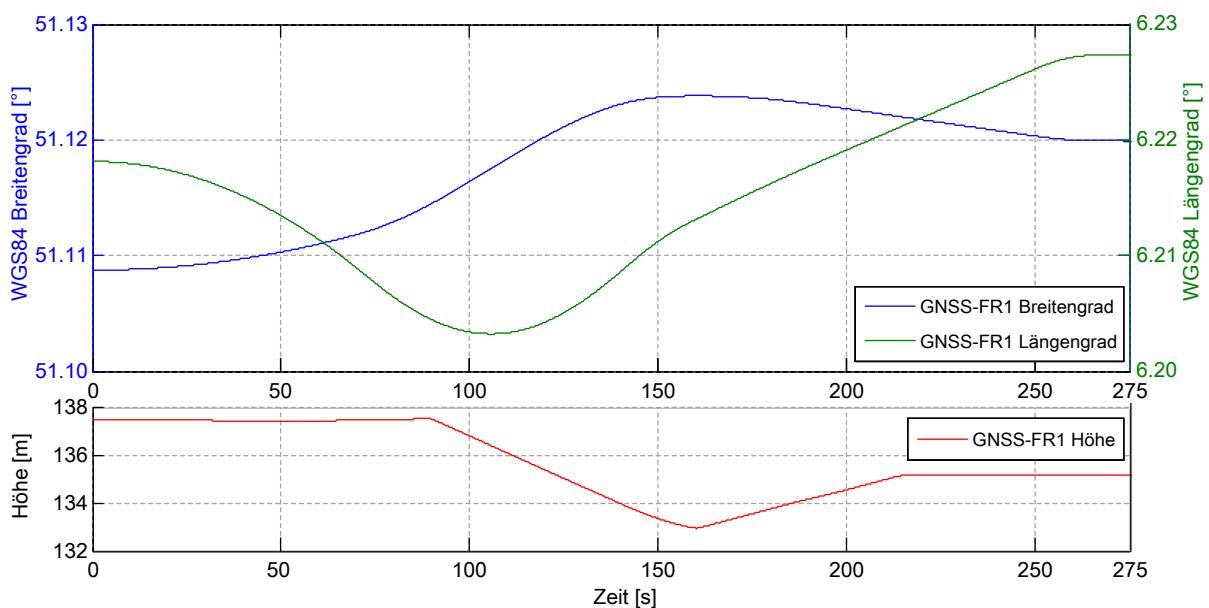


Abb. 102: Ideale GNSS-FR1 Antennenposition (WGS84)

Die technische Schnittstelle des Sensormodells (Sensor-Technikmodell) bildet das als Simulink-Bus nachgebildete NMEA-Datenformat, in dem die Datensätze RMC (Recommended Minimum Sentence), GLL (Geographic Position – Latitude/Longitude) und GGA (Global Positioning System Fix Data) implementiert sind. Im Technik-Störungsmodell werden die Datensätze zeitlich diskretisiert und nur zu diskreten Abtastzeitpunkten aktualisiert. Der Abtastzyklus der NMEA-Datensätze ist

an den Sekundenzyklus der GPS-Zeit gekoppelt. Die Abtastzeitpunkte der Datensätze beziehen sich auf Vielfache der Abtastzeit. Tabelle 2 gibt die für dieses Szenario gewählten Parameter an.

Tabelle 2: Szenarioeigenschaften der NMEA-Datensätze

Datensatz (NMEA)	Abtastrate [Hz]	Zykluszeit [ms]	Empfangsverzögerung [ms]	Empfangsverzögerung [%]
RMC	10	100	14	14
GLL	2	500	126	25,2
GGA	1	1000	358	35,8

Durch Verarbeitungs- und Übertragungszeiten sind die aktuellen NMEA-Datensätze erst zu einem variablen Zeitpunkt während des nächsten Abtastzyklusses verfügbar. Die Empfangsverzögerung setzt sich zusammen aus einer Wartezeit bis die digitale Schnittstelle frei ist, einer Übertragungszeit über die digitale Schnittstelle und einer Verarbeitungszeit im Empfänger. Der RMC-Datensatz wurde mit einer hohen Abtastrate und einer priorisierten Übertragung angenommen. Im Empfänger wird eine Verarbeitungszeit von 10 ms und eine Übertragungszeit von 4 ms vorgegeben. Für den GLL- und GGA-Datensatz wird aufgrund seiner ähnlichen Bytelänge eine gleiche Übertragungszeit von 4 ms definiert. Die Verarbeitungszeiten und die Buswartezeit werden zur besseren Darstellung deutlich erhöht.

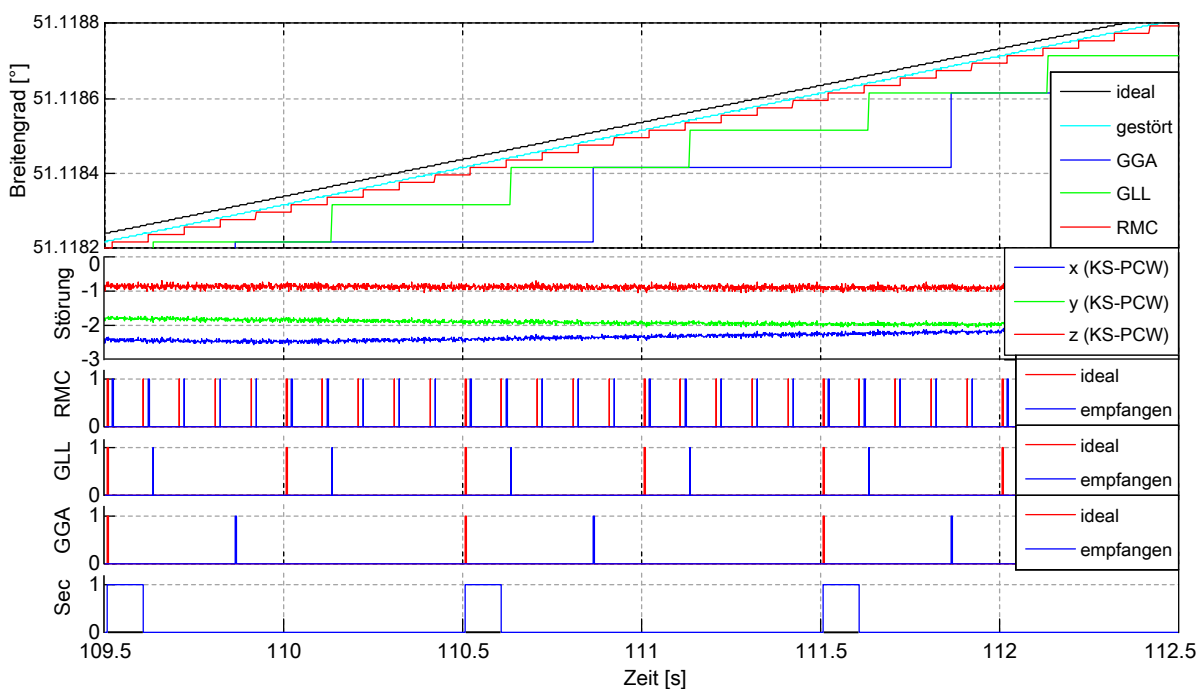


Abb. 103: GNSS Technikmodell, zeitliche Auflösung der NMEA-Botschaften eines funktionalen GNSS-Empfängers

Ausgehend von der in Abb. 102 dargestellten idealen Position des GNSS-FR1 Sensors werden in Abb. 103 die Signale des Sensor-Physikmodells, des Physik-Störungsmodells sowie die technischen Signale des Sensor-Technikmodells und des Technik-Störungsmodells gezeigt.

Das Physik-Störungsmodell erzeugt in einem lokalen NED-Koordinatensystem für jede Achse separate Positionsabstände. Die erzeugten Störungen orientieren sich an den Qualitätseigenschaften eines GNSS-Einfrequenzempfängers mit schlechten Empfangsbedingungen. In dem implementierten Szenario wird auf die X-Achse ein Sägezahn mit maximal 3 m und einer Zykluszeit von 30 Sekunden aufgeprägt. Auf der Y- und Z-Achse sind Sinusschwingungen mit einer Periodendauer von 30 bzw. 300 Sekunden und einer Amplitude von $1,5\text{ m}$ aufgeprägt. Allen Achsen wird additiv weißes Rauschen überlagert. Die im KS-PCW erzeugten Störabstände werden in das ECEF-Koordinatensystem transformiert und der idealen Position aufaddiert.

In Abb. 103 ist im oberen Diagramm in Schwarz das ideale Signal des Breitengrades im WGS84-Datum eingezeichnet. In Cyan ist die mit den Störeinflüssen aus dem zweiten Diagramm beaufschlagte Spur des Breitengrades eingezeichnet. In Rot ist das häufig aktualisierte Breitengradsignal des RMC-Datensatzes dargestellt. Mit steigendem Alter des (schon gestörten) Breitengrad-Messwertes vergrößert sich durch die Bewegung des Fahrzeuges der Abstand zur idealen Position weiter. Wegen der niedrigeren Abtastraten der Datensätze GLL und GGA und der Übertragungszeit wird dieser Effekt proportional größer.

In den Diagrammen RMC, GLL und GGA sind in Rot die Auslösezeitpunkte der Datensätze eingezeichnet. In Blau sind die Zeitpunkte eingezeichnet, in denen die Datensätze nach der Verzögerungszeit verfügbar sind.

Im untersten Diagramm in Abb. 103 ist das Signal des Sekundenpulses dargestellt. Der Sekundenpuls erzeugt zu Beginn jeder neuen Sekunde der UTC-Zeit eine steigende Flanke. Das Szenario beginnt am 31.10.2014 um 2:18:30,490 Uhr UTC. Somit beginnt eine neue Sekunde in UTC-Zeit und GPS-Zeit nach 0,510 Sekunden jeder simulierten Sekunde.

7.2.5 Inertial Measurement Unit (IMU) (3D-Bewegungssensorik)

Das IMU-Modell nach Abschnitt 5.12.2 beschreibt ein integriertes Inertialsensorsystem aus je drei orthogonal zueinander angeordneten Beschleunigungs-, Drehgeschwindigkeits- und Magnetfeldsensoren. Die Eigenschaften des Sensormodells werden anhand des Simulationsszenarios aus Abschnitt 7.1.1 dargestellt.

7.2.5.1 Sensor-Physikmodell

Abb. 104 zeigt die physikalischen Bewegungssignale des IMU-Sensors. Im oberen Diagramm sind die drei Beschleunigungen in den drei Raumrichtungen eingezeichnet. An der Beschleunigung in X-Richtung (Rot) sind die Beschleunigungs- und Bremsvorgänge in Fahrzeuginnenrichtung zu erkennen. In einer ersten Beschleunigungsphase wird das Schienenfahrzeug mit $0,3 \text{ m/s}^2$ auf die Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h beschleunigt. In einer ersten Bremsphase verringert das Schienenfahrzeug die Geschwindigkeit von 80 km/h auf 40 km/h . In der zweiten Bremsphase ab Simulationszeit $t_{sim} \geq 250 \text{ s}$ beträgt die Verzögerung durch das Fahrermodell $-0,635 \text{ m/s}^2$. Kurz darauf erhöht sich die Betriebsbremsung durch die Auslösung der Zwangsbremse des ETCS-Fahrzeugsteuergerätes auf $-0,77 \text{ m/s}^2$. Aus dem Geschwindigkeitsverlauf in Abb. 87 und Abb. 88 ergibt sich die Beschleunigung bis zum Zielpunkt.

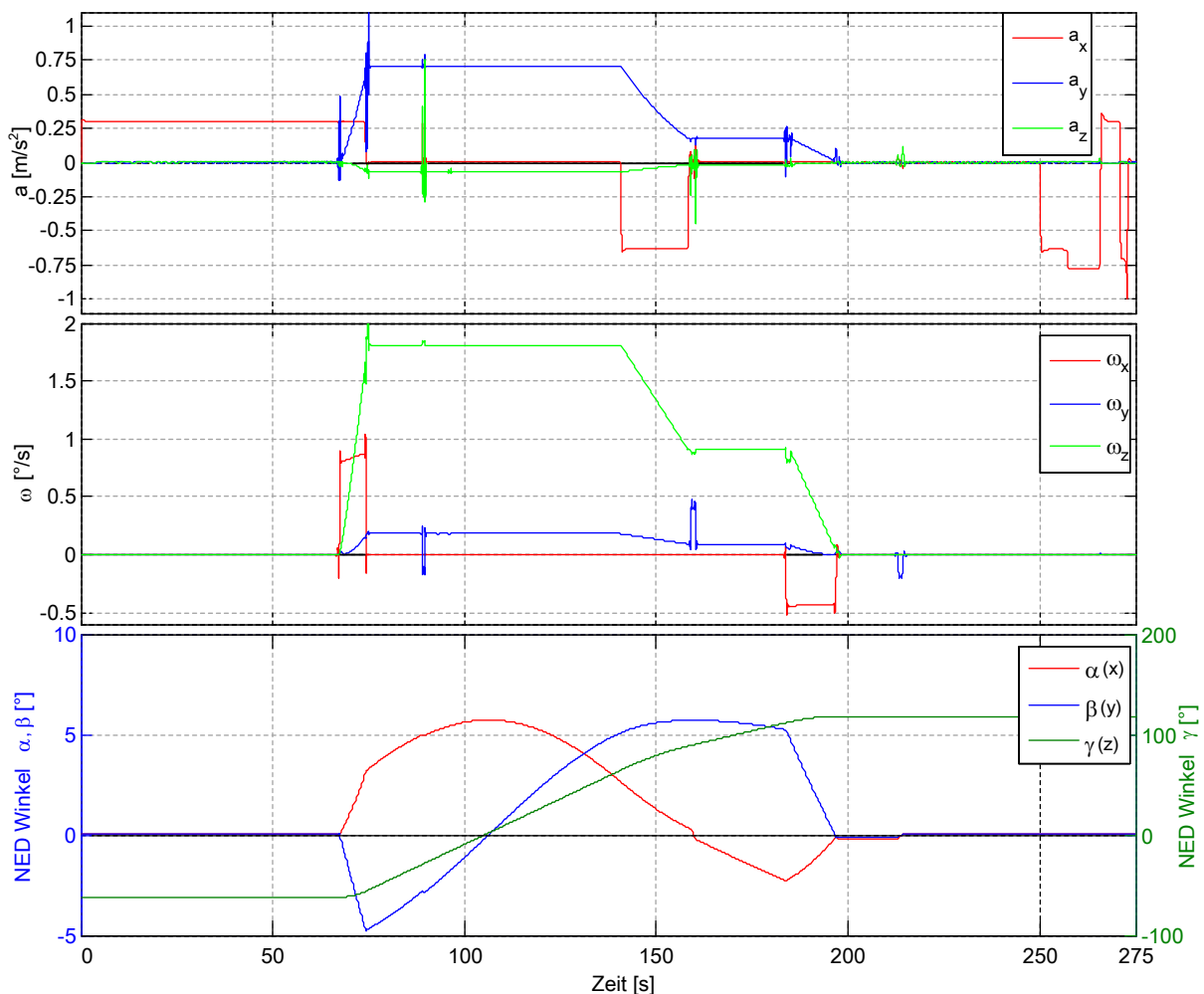


Abb. 104: Dreidimensionale Beschleunigungen (oben), Winkelgeschwindigkeiten (Mitte) und Richtungswinkel (unten) des IMU-Sensors während des Simulationsszenario aus Abschnitt 7.1.1

In Abb. 104 (oben) ist in Blau die Beschleunigung in Y-Richtung des IMU-Koordinatensystems eingezeichnet, was näherungsweise der Querbeschleunigung des Schienenfahrzeuges entspricht. Zwischen der Simulationszeit $t_{sim} = 64 \dots 74,5 \text{ s}$ fährt das Schienenfahrzeug in einer Klothoide in den nordwestlichen Bogen (siehe Abb. 84) ein. Hierbei wird die Krümmung kontinuierlich bis zu einem Bogenradius von 700 m erhöht. Die Krümmung und die Geschwindigkeit des Fahrzeuges erzeugen eine Querbeschleunigung in Y-Richtung und eine Rotationsgeschwindigkeit um die Z-Achse. Durch die Geschwindigkeitsreduzierung nach rund 150 Sekunden auf 40 km/h verringern sich auch die Querbeschleunigung und die Rotationsgeschwindigkeit.

In der ersten Klothoide wird eine Überhöhung von 150 mm aufgebaut. Die Rollbewegung um die Fahrzeuglängsachse ist an der charakteristischen Winkelgeschwindigkeit um die X-Achse (Rot in der Mitte von Abb. 104) sichtbar.

Das Höhenprofil der Strecke (siehe Abb. 102 unten) führt zu einem Gefälle entlang der Trajektorie und ändert sich an diskreten Punkten. Das Höhenmodell hat in der aktuellen Implementierung keine Ausrundungen der Gradientenänderungen. Zwischen den Drehgestellen ändert sich die Ausrichtung des Wagenkastens kontinuierlich, was an einer konstanten Winkelgeschwindigkeit um die Y-Achse (Blau in der Mitte von Abb. 104) zu erkennen ist. Da es sich bei dem Mehrkörpermodell um ein physikalisches massebehaftetes Modell handelt, führen die starken Beschleunigungen in den Punkten der Gefälleänderung zu (gedämpften) Schwingungen des Fahrzeugmodells. Die Impulsenergie wird durch Dämpfungselemente abgebaut.

Der NED-Winkel in Abb. 104 (unten) beschreibt die Ausrichtung des IMU-Koordinatensystems zu einem nach Norden ausgerichteten lokalen NED-Koordinatensystem. Mit der Ausrichtung des Sensor-Koordinatensystems im lokalen NED-Koordinatensystem durch die NED-Richtungswinkel können die Richtungsanteile des Erdbeschleunigungsvektors auf die Beschleunigungssensorelemente bestimmt werden.

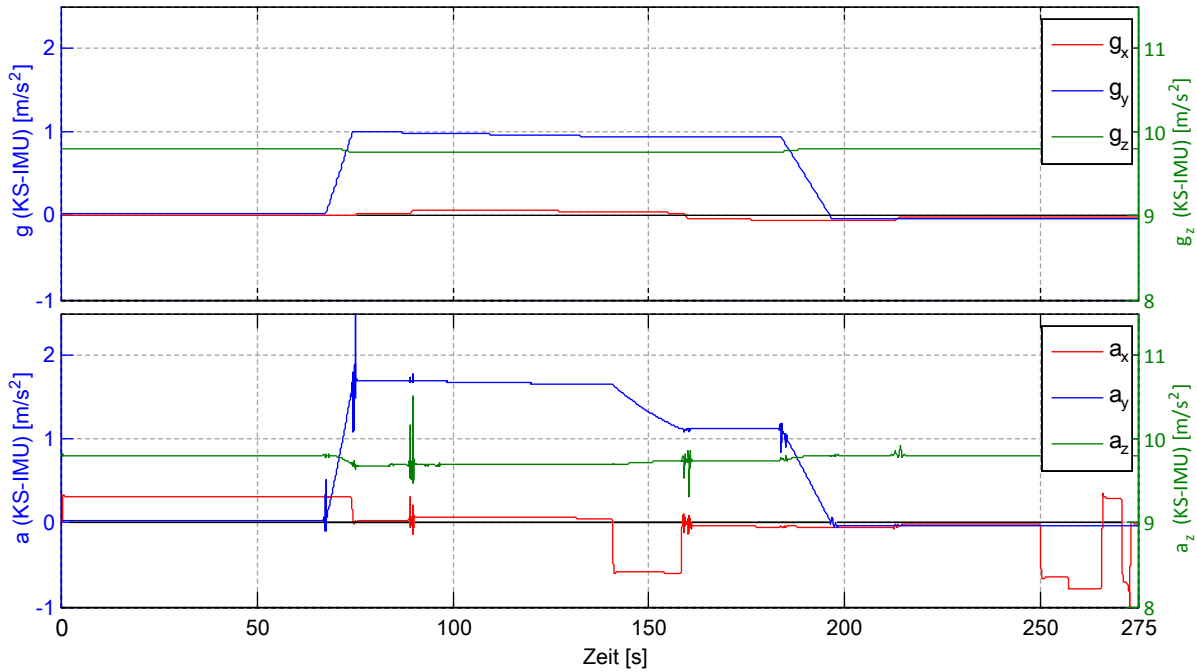


Abb. 105: Einfluss der Erdbeschleunigung. Erdbeschleunigungsvektor im KS-IMU (oben), Bewegungsbeschleunigung und Erdbeschleunigung im KS-IMU (unten)

In Abb. 105 (oben) sind die Anteile des Erdbeschleunigungsvektors im Sensorkoordinatensystem KS-IMU dargestellt. Die Richtungsanteile werden der Bewegungsbeschleunigung aufaddiert. Die durch den IMU-Sensor in einer realen Messanordnung ideal messbaren Beschleunigungen sind in Abb. 105 (unten) dargestellt.

7.2.5.2 Physik-Störungsmodell

Alle Sensorkanäle können im Physik-Störungsmodell nach Abschnitt 5.12.2.2 durch additives Rauschen, Offset und veränderter Signalverstärkung verändert werden. Auf eine Anwendung des Modells auf die Signalkanäle des IMU-Sensors wird hier verzichtet und auf die bereits vorgestellten Physik-Störungsmodelle mit ähnlichen Eigenschaften verwiesen.

Die Winkelgeschwindigkeitsmessung des IMU-Sensors wird jedoch systematisch durch die Erdrotation ω_{ie}^i beeinflusst. Abb. 106 zeigt diese Störung in den linken beiden Teilbildern im Navigationskoordinatensystem KS-NED ω_{--}^n . Die beiden rechten Teilbilder nutzen das Sensorkoordinatensystem KS-IMU ω_{--}^{IMU} . Die Erdrotation ω_{ie} ist in den beiden oberen Teilbildern eingezeichnet und die beiden unteren Teilbilder zeigen die Transportrate ω_{en} .

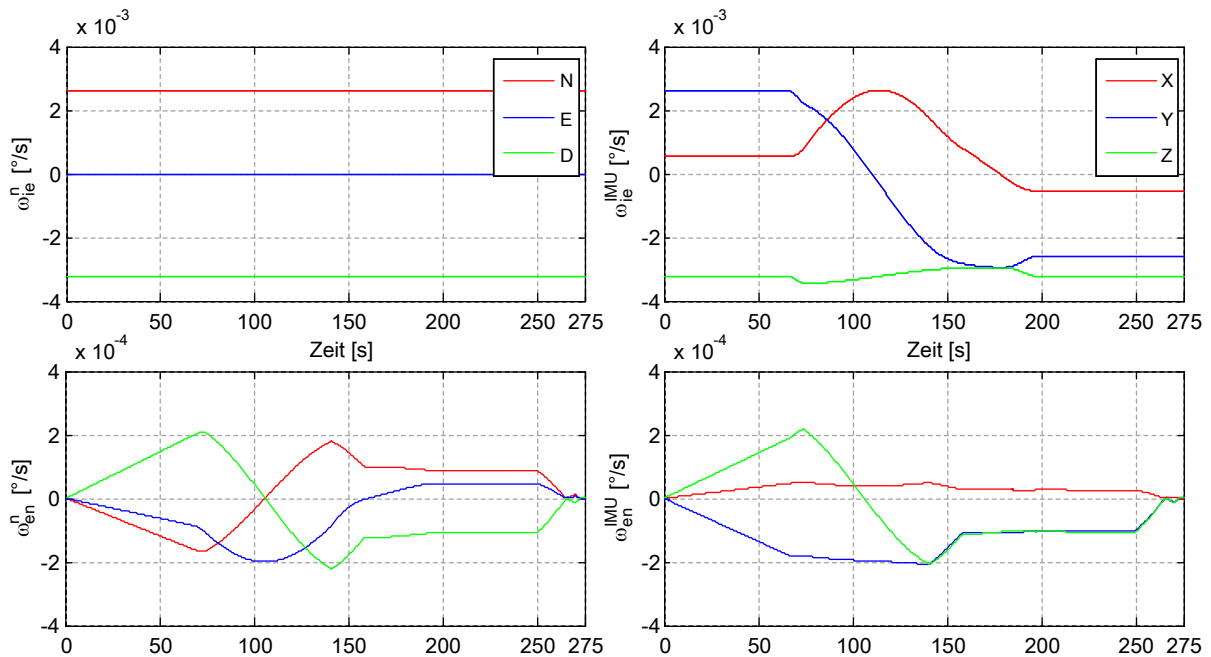


Abb. 106: Physikalische Störung der Bewegungs-Winkelgeschwindigkeit durch die Erdrotation

Die aus der Erdrotation entstehenden Winkelgeschwindigkeiten werden der aus der Bewegung des Schienenfahrzeuges entstandenen Winkelgeschwindigkeit als physikalische Störung aufaddiert. Durch die unterschiedlichen Größenordnungen zwischen den aus der Bewegung messbaren Winkelgeschwindigkeiten und den Störungen aus der Erdrotation ergeben in Abb. 104 (Mitte) keine sichtbaren Veränderungen.

Auf ein Fehlermodell wird hier verzichtet.

7.2.5.3 Sensor-Technikmodell

Der IMU-Sensor sendet seine Messdaten (Beschleunigung, Drehrate, Magnetometer in drei Raumrichtungen) über eine digitale Schnittstelle aus, sodass die Messdaten im Sensor-Technikmodell nicht konvertiert werden müssen.

Im Technik-Störungsmodell werden auf die einzelnen Messkanäle Signalstörungen nach Abschnitt 5.9.5 (wie in den vorangegangenen Sensorbeschreibungen schon gezeigt) aufgebracht. Im Technik-Fehlermodell werden auf den Messkanälen Fehler-situationen erzeugt, wie sie in Abschnitt 5.9.6 beschrieben sind. Auf die Darstellung des Technik-Störungsmodells und eines Technik-Fehlermodells wird hier verzichtet.

In der Simulationsumgebung wird dem Technik-Fehlermodell ein Technik-Schnittstellenmodell nachgeschaltet. Darin wird ein Simulink-Bus aus der Busdefinition des IMU-Sensors auf dem Echtzeitsystem des IFS-Erprobungsträgers erzeugt.

7.3 Analyse des Satellitennavigationsmodells

In der Simulationsumgebung werden die absoluten Positionen des Schienenfahrzeuges durch eine Koordinatentransformation aus der Mehrkörpersimulation (MKS) in das ECEF-Koordinatensystem konvertiert. Das GNSS-Modul der Simulationsumgebung (Abschnitt 5.13) berechnet aus der GNSS-Antennenposition des Fahrzeuges und den Satellitenpositionen die wahren Abstände und Pseudoabstände als Rohdaten des simulierten GNSS-Empfängers.

Das Modell wird zwei Szenarien ausgesetzt:

1. In der simulierten freien Fahrt auf dem Testring T1 des PCWs aus Abschnitt 7.1.1 wird die Funktionalität des Modells beschrieben.
2. In dem Szenario aus Abschnitt 6.1 werden die Simulationsergebnisse den Messungen auf dem Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ gegenübergestellt.

In beiden Testfahrten werden die gleichen absoluten Anfangszeitpunkte der Simulationen und der gleiche Parametersatz an Bahndaten (Ephemeriden) der GNSS-Satelliten genutzt. Demnach sind die Positionen der GNSS-Satelliten in beiden Szenarien identisch. Die verwendeten Parameter sind in Anhang B.8 vollständig dokumentiert.

7.3.1 GNSS-Weltraumsegment (Sensor-Physikmodell)

Die Positionen der Satelliten werden im GNSS-Weltraumsegment Modell nach Abschnitt 5.13.1 berechnet. In den hier verwendeten Broadcast-Ephemeridendaten (Anhang B.8) sind 31 von 32 GPS-Satelliten eingetragen. Der Satellit PRN-3 war zu dieser Zeit nicht aktiv.

In Abb. 107 ist die Richtung der GPS-Satelliten, in Kugelkoordinaten vom Erdmittelpunkt aus, zum Startzeitpunkt des in Abschnitt 7.1.1 beschriebenen Szenarios (31.10.2014 2:18:30.490 Uhr UTC), dargestellt. Der Abstand vom Erdmittelpunkt beträgt bei allen Satelliten rund 26500 km.

Auf der linken Seite in Abb. 107 sind die GPS-Satelliten in einem sphärischen Koordinatensystem dargestellt. Die außen angezeichneten Winkel sind die Azimutwinkel. Die Kreise mit unterschiedlichen Radien beschreiben die Elevationswinkel. Auf der rechten Seite sind dieselben Satelliten in einem kartesischen Koordinatensystem eingezeichnet. Der Azimutwinkel auf der Äquatorebene wird, vom Nullmeridian (Greenwich) ausgehend, entgegen dem Uhrzeigersinn (mathematisch positiv) gezählt. Der Elevationswinkel wird von der Äquatorebene (Elevationswinkel 0°) zum Nordpol positiv und zum Südpol negativ gezählt. In Blau sind die Satelliten dargestellt, die sich über der Nordhalbkugel befinden. In Rot dargestellte Satellitenpositionen befinden sich über der Südhalbkugel. Der eingezeichnete Standort

beschreibt die Richtung der Antennenposition des GNSS-4 Empfängers vom Erdmittelpunkt aus.

Während der Szenariodauer bewegen sich die Satelliten um weniger als zwei Grad von der dargestellten Position weiter.

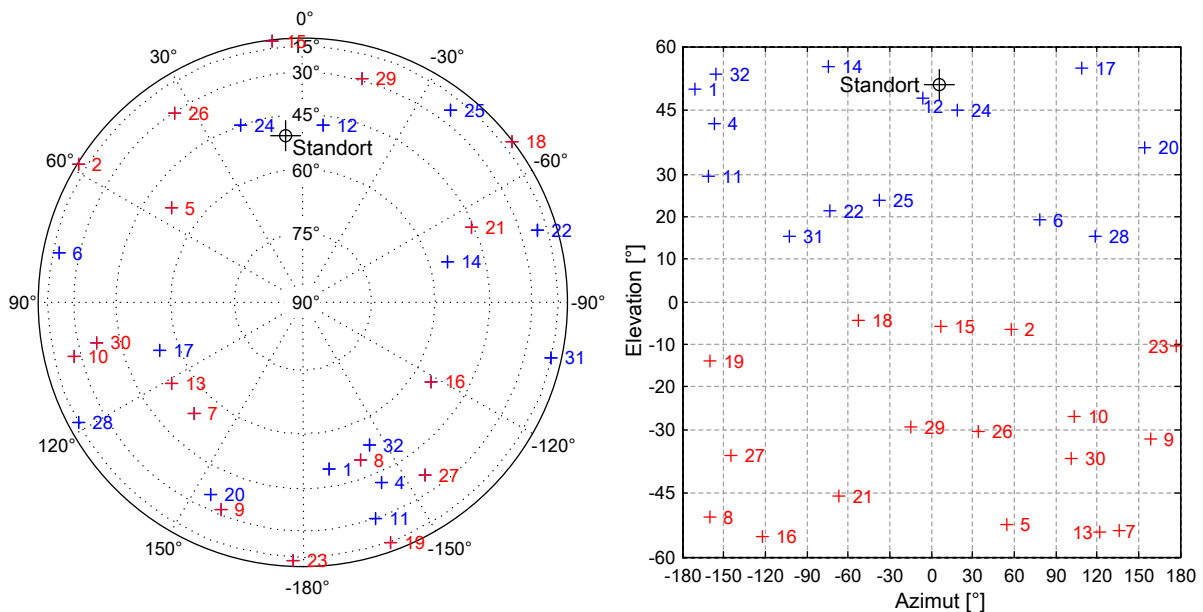


Abb. 107: GPS-Satellitenrichtungen (Kreuze) in sphärischen Koordinaten mit PRN-Nummer der Satelliten, vom Erdmittelpunkt aus betrachtet

In Anhang C.1 sind die aus den Broadcast-Ephemeriden berechneten Satellitenposition zum Zeitpunkt 31.10.2014 2:00:00,0 Uhr mit den veröffentlichten Satellitenpositionsmessung (Anhang B.9) verglichen worden. Die mittlere dreidimensionale Abweichung beträgt 1,3 Meter. Die maximale Abweichung beträgt 3,4 Meter (PRN-29). Die finalen Ephemeridendaten (Anhang B.10) im TLE-Format wurden aufgrund des Parametersatzes nicht untersucht.

7.3.2 GNSS-Benutzersegment (Sensor-Physikmodell)

Im GNSS-Benutzersegment werden die Eigenschaften des Satellitennavigationsempfängers zusammengefasst. Im ersten Teil dieses Abschnitts wird die Situation des Empfängers anhand der Satelliten des GNSS-Weltraumsegmentes aus der Sicht des GNSS-Empfängers beschrieben. Im zweiten Teil des Abschnitts werden die Abstände zwischen den Satelliten und dem Empfänger als „wahrer Abstand“ und ideale Rohdaten des GNSS-Empfängers analysiert.

Die Sichtbarkeit von Satellitenpositionen durch die Empfängerantenne wird durch den Elevationswinkel über dem künstlichen Horizont der Empfängerantenne ermittelt. Um die lokalen Verhältnisse an der Position der Empfängerantenne zu erzeugen, werden die Satellitenpositionen im ECEF-Koordinatensystem nach Anhang D.2.9 in ein loka-

les NED-Koordinatensystem (North-East-Down) mit dem Koordinatenursprung an der Position der GNSS-Fahrzeugantenne (GNSS-4) transformiert. Die horizontale XY-Ebene entspricht in dieser Darstellung einer tangentialen Ebene an der Erdkugel (oder des Erdellipsoiden). Der Azimutwinkel ist von Norden aus im Uhrzeigersinn positiv definiert. Der positive Elevationswinkel ist vom künstlichen Horizont (in den Himmel) zur aufgerichteten Vertikalen positiv definiert.

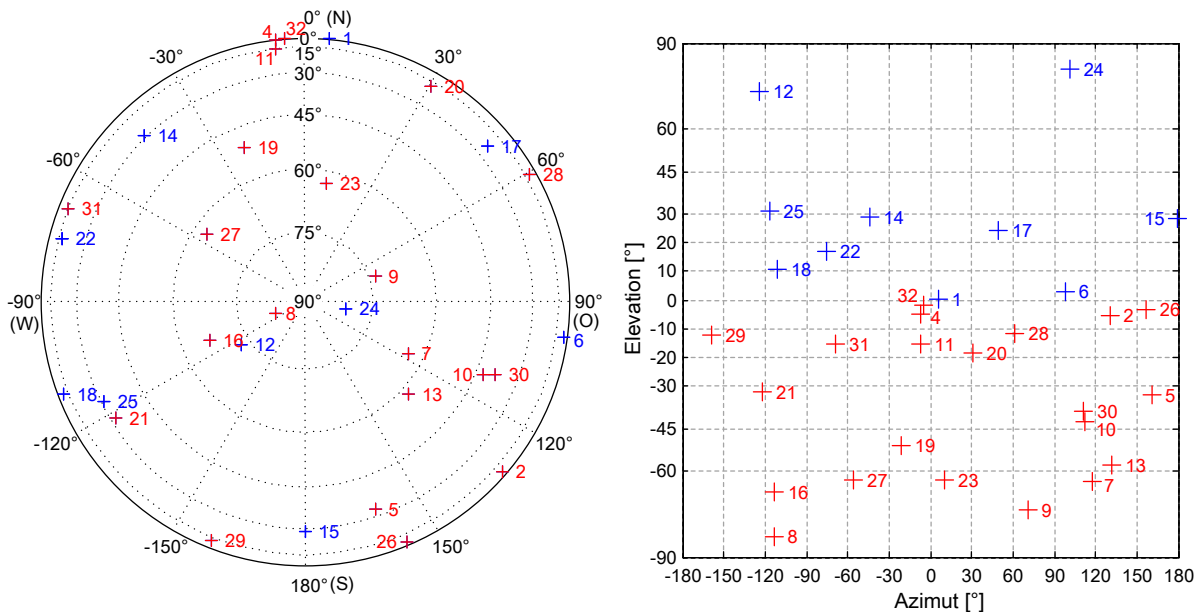


Abb. 108: GPS-Satellitenrichtungen (Kreuze) mit Satellitennummer (PRN) auf einem Skyplot an der GNSS-4 Sensorposition

Abb. 108 zeigt die Richtungen zu den GNSS-Satelliten (von der Position der GNSS-Antenne des Fahrzeuges aus) als Skyplot. In Blau sind die Satelliten eingezeichnet, die sich in der Halbkugel oberhalb des künstlichen Horizontes befinden. Die rot dargestellten Satelliten befinden sich unter dem künstlichen Horizont und sind für die GNSS-Fahrzeugantenne nicht sichtbar.

Der wahre Abstand zwischen GNSS-Antenne und GNSS-Satelliten wird im ECEF-Koordinatensystem nach Abschnitt 5.13.2.2 gemessen. In Anhang C.2 und Anhang C.3 werden exemplarisch je ein Datensatz mit wahren Abständen (Truerange) und Pseudoabständen dargestellt.

Als Kontrollrechnung wird ein 3D-Positionsvergleich zwischen der ECEF-Position des GNSS-3 Empfängers und der aus den wahren Abständen des GNSS-4 Empfängers mit dem Gauß-Newton-Verfahren (Anhang C.4) berechneten GNSS-4 Empfängerposition untersucht. Da es sich bei den Satellitenpositionen und den wahren Abständen um ideale Signale handelt, muss sich aus der Kombination eindeutig die Empfängerposition berechnen lassen. Hierfür wird aus den Satellitenrohdaten die Position des GNSS-4 Empfängers berechnet und mit der in der Simulationsumgebung bekannten

Position des GNSS-3 Empfängers verglichen. Die GNSS-3 und GNSS-4 Empfänger benutzen im 5-Körper-Modell der Simulationsumgebung denselben Marker, sodass die Positionen der Empfänger identisch sind. Weiterhin ist die ebenfalls mit dem Gauß-Newton-Verfahren geschätzte Zeitabweichung der Empfängeruhr ein Indikator für die Genauigkeit des Berechnungsverfahrens.

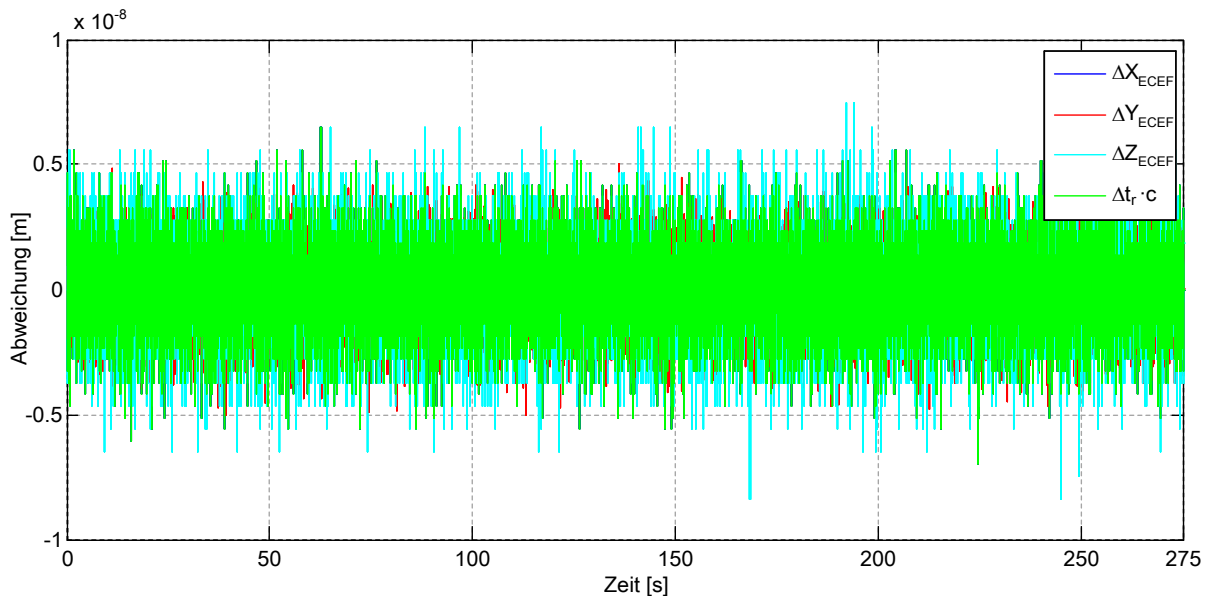


Abb. 109: Abweichung zwischen der GNSS-3 Position und der aus den wahren Satellitenabständen berechneten GNSS-4 Position

In Abb. 109 wird der Abstand zwischen der aus den wahren Abständen berechneten GNSS-4 Antennenposition und der GNSS-3 Antennenposition (siehe Abschnitt 7.2.4) dargestellt. Sowohl die Positionsabweichung als auch die Distanz aus der Zeitabweichung der Empfängeruhr sind kleiner als $10^{-8}m$, also im Bereich des numerischen Rauschens.

7.3.3 Erddrehung während der Signallaufzeit

Während der Signallaufzeit des GNSS-Signals zwischen Satellit und Empfänger drehen sich die Erde und das fest mit der Erde verbundene ECEF-Koordinatensystem weiter. Da sich das Signal des Satelliten jedoch im Inertialkoordinatensystem der Erde nur mit Lichtgeschwindigkeit bewegen kann, müssen die Positionen der Satelliten in das ECEF-Koordinatensystem zum Empfangszeitpunkt des Empfängers transformiert werden. Aus den bestimmten wahren Abständen ohne Signallaufzeitkompensation werden in einem Iterationsschritt die physikalische Signallaufzeit mit der Vakuum-Lichtgeschwindigkeit zurückgerechnet und der Erdrotationswinkel während der Signallaufzeit für jede Satellitenmessung bestimmt.

In Anhang C.2 sind die gedrehten Satellitenpositionen, die Veränderung der Satellitenpositionen und die Auswirkung auf die wahren Abstände dargestellt. In dieser Situation ergibt sich für den Satellit PRN-18 die größte Positionsänderung mit 159,381m. Durch geometrische Verhältnisse wird der wahre Abstand von Satellit PRN-06 mit $-24,071\text{ m}$ am stärksten beeinflusst.

7.3.4 GNSS-Benutzersegment-Störungsmodell

Die bei realen Messungen zu erwartenden systematischen und stochastischen Störungen der wahren Abstände zwischen GNSS-Satellit und GNSS-Empfänger werden im Physik-Störungsmodell zusammengefasst. In diesem Abschnitt werden die simulierten Störeinflüsse am Beispiel des Szenarios aus Abschnitt 7.1.1 beschrieben. Der Pseudoabstand wird aus dem wahren Abstand und den Störeinflüssen gebildet.

Die Zeitabweichung der Satellitenuhr Δt_{sv} ist aus den Ephemeriden (Abschnitt 5.13.3.1, Anhang B.8) bekannt. Die sich für das Szenario in Abschnitt 7.1.1 ergebenden Zeitabweichungen der Satellitenuhren sind in Anhang C.3 für den Referenzzeitpunkt 31.10.2014 2:00:00 Uhr dokumentiert. Der Satellit PRN-29 (unterhalb des künstlichen Horizonts) weist zu diesem Zeitpunkt die größte Uhrenabweichung von 0,571156 Millisekunden auf, was einer Distanzabweichung von rund 171 Kilometern entspricht. In Abb. 110 ist der Störabstand durch die Zeitabweichung der Satellitenuhren Δt_{sv} dargestellt.

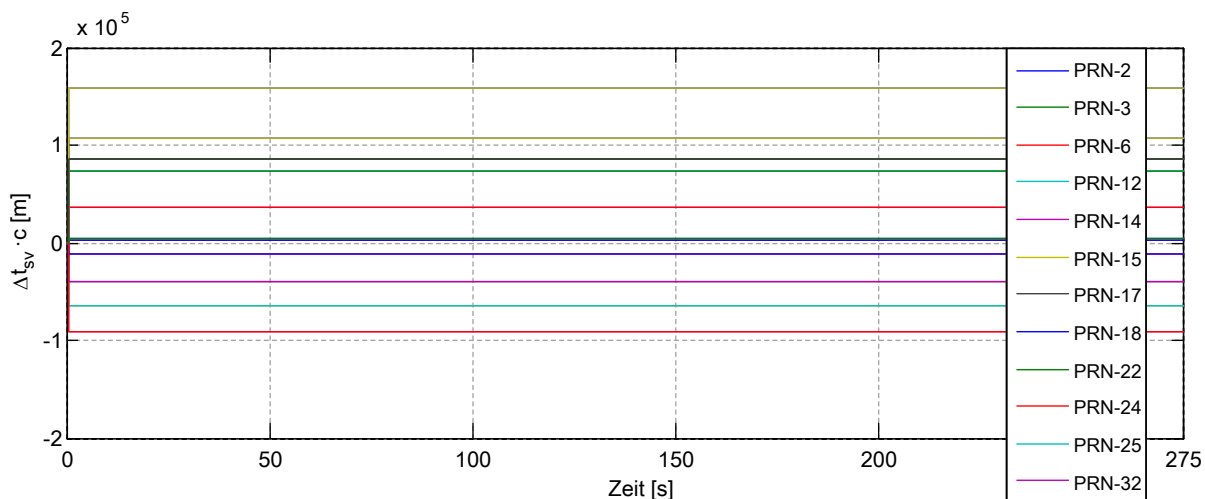


Abb. 110: Wegabweichung durch Zeitabweichung der Satellitenuhren der sichtbaren Satelliten

Die in Abschnitt 5.13.3.3 beschriebenen Störungen der Pseudoabstandsmessung werden in einem zusammenfassenden Szenario einer Zugfahrt folgendermaßen umgesetzt:

- Die Zeitabweichung der Empfängeruhr wird mit einer (unrealistisch hohen) Rate von $5 \mu\text{s/s}$ in der Simulationsumgebung erzeugt. Es wird eine maximale Uhrenabweichung $t_{r,err \max}$ festgelegt:

$$t_{r,err \max} = 10^{-5} \text{ s} \rightarrow s_{r,err \max} = t_{r,err \max} \cdot c = 2997,924 \text{ m}$$

Nach 200 Sekunden hat die Zeitabweichung ihr Maximum erreicht und wird auf Null zurückgesetzt.

- Es gibt einen satellitenunabhängigen statischen Abstandsfehler von 0,5 Metern und ein Abstandsrauschen mit einer Amplitude von einem Meter.
- Störung S1: Von Simulationssekunde $t_{sim} \geq 50 \text{ s}$ bis $t_{sim} < 60 \text{ s}$ fährt der Empfänger an einem hohen Gebäude vorbei, und nur die nördlich (Azimut = $-90^\circ \dots 90^\circ$) sichtbaren Satelliten sind zu empfangen
- Störung S2: Danach fährt der Zug durch einen Tunnel. Dadurch ist zwischen Simulationssekunde $t_{sim} \geq 60 \text{ s}$ und $t_{sim} < 90 \text{ s}$ kein Satellit sichtbar.
- Störung S3: Zwischen Simulationssekunde $t_{sim} \geq 150 \text{ s}$ und $t_{sim} < 200 \text{ s}$ fährt der Zug an einem Wald vorbei und alle Pseudoabstandsmessungen zu Satelliten mit einer Elevation kleiner 40° werden zufällig um einen Meter und einen Rauschanteil verlängert oder abgeschattet.
- Als technische Störung erzeugt der Empfänger nur zu jeder vollen UTC-Sekunde einen neuen Datensatz. Zur Datenübertragung werden die Pseudoabstandssignale um 0,2 Sekunden verzögert.

Aus dem oben beschriebenen Szenario ergeben sich die in Abb. 111 (unten) dargestellten Zustandsvariablen S1, S2 und S3. Im oberen Teil sind die gestörten Pseudoabstände dargestellt, so wie sie der GNSS-Empfänger empfangen hat.

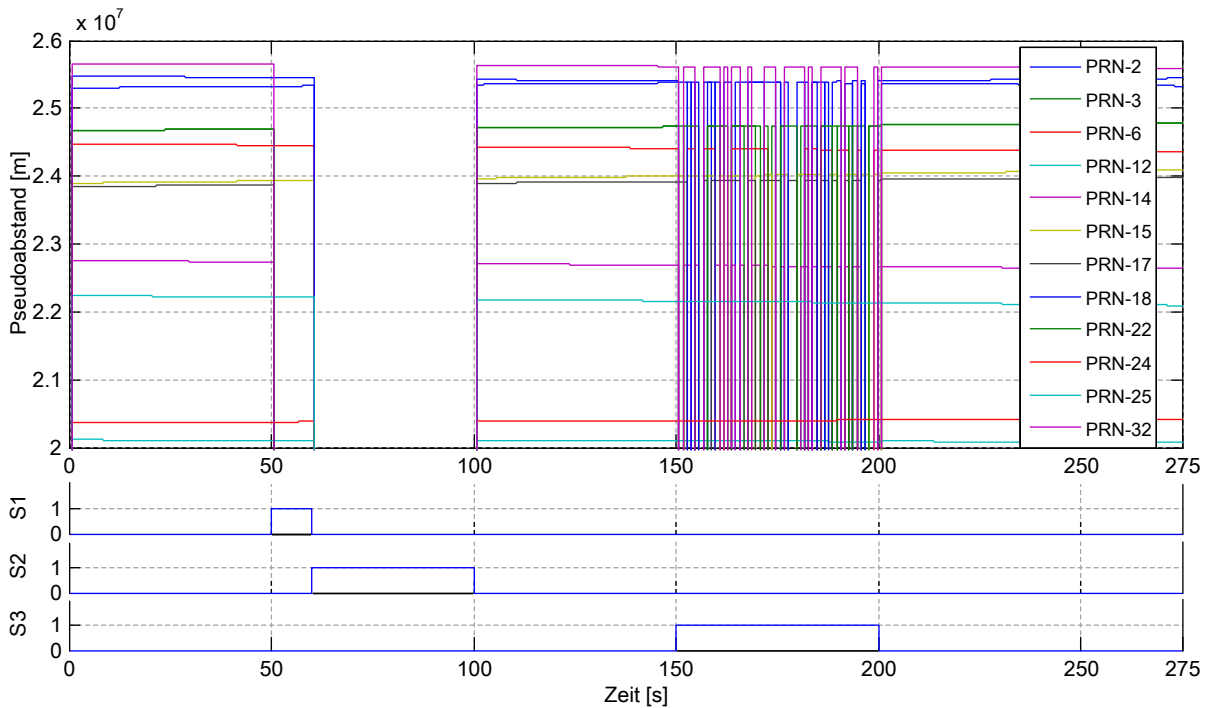


Abb. 111: Pseudoabstand mit Störungen zwischen GNSS-Empfänger und GNSS-Satelliten

Die Störsituationen erzeugen die in Abb. 111 (oben) dargestellten Pseudoabstandsmessungen. Daraus ergibt sich die in Abb. 112 dargestellte Anzahl der für den Empfänger sichtbaren Satelliten.

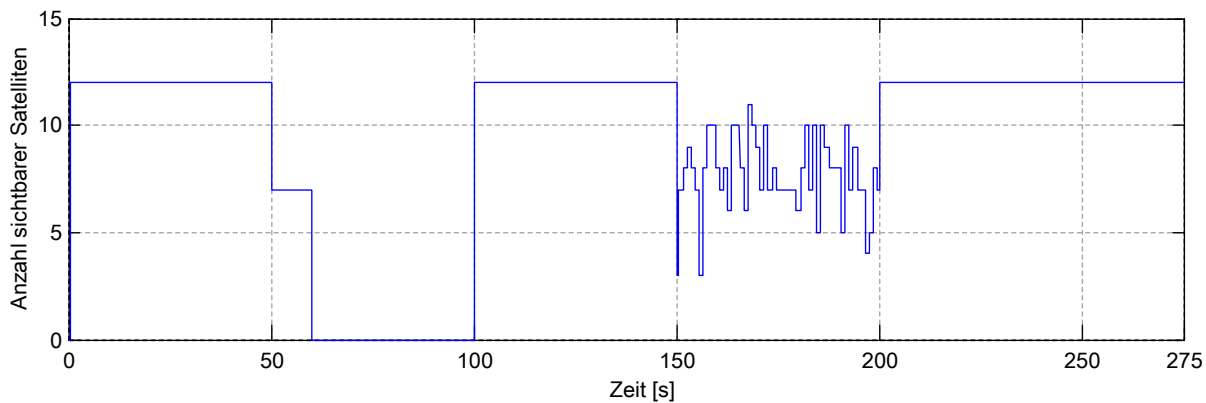


Abb. 112: Anzahl sichtbarer Satelliten

In Abb. 113 sind die Empfängeruhrenabweichung und ein verallgemeinerter Störabstand mit Rauschanteil dargestellt, die auf alle Pseudoabstände gleich wirken.

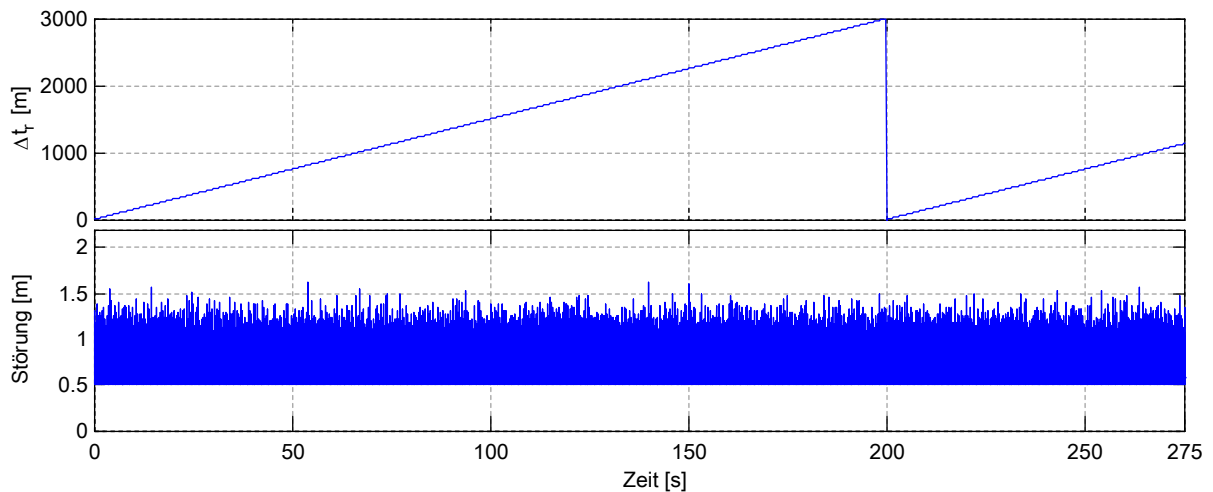


Abb. 113: Störungen auf alle Pseudoabstandsmessungen

Der Pseudoabstand wird in einer standardisierten Datenstruktur (Simulink-Bus) abgelegt. Die Datenstruktur ist durch eine Bibliothek identisch zu der auf dem Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ vorhandenen Schnittstelle des EPT GNSS-4 Sensors.

7.3.5 Vergleich der Pseudoabstandsmessung zwischen Simulationsumgebung und der Messung auf dem Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“

Zur Validierung der Pseudoabstände wird die idealisierte Pseudoabstandsgenerierung des GNSS-Moduls der Simulationsumgebung mit der Pseudoabstandsmessung des GNSS-4 Sensors auf dem Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ verglichen.

In der bereits in Abschnitt 6.2 beschriebenen Testfahrt wird zu einem bestimmten Zeitpunkt (Uhrzeit UTC: 02:18:47 Uhr, Sample: 476, GPS-TimeOfWeek TOW: 440327,0 s) eine Pseudoabstandsmessung durch den GNSS-4 Empfänger fertiggestellt. Die im GNSS-Modul erzeugte Pseudoabstandsmessung bestehen aus folgenden Komponenten:

- dem wahren Abstand zwischen GNSS-Satellit und Phasenzentrum der GNSS-Antenne
- systematischen Störungseinflüssen aus der Erddrehung
- Satelliten- und Empfängeruhrenabweichung

Die Zeitabweichung der Empfängeruhr des EPT-GNSS-4 Sensors wurde mit dem Gauß-Newton-Verfahren (Anhang C.4) auf

$$dt_r = -1,9147 \cdot 10^{-4} \text{ s} \rightarrow ds_r = dt_s \cdot c = -57401,889 \text{ m}$$

geschätzt. In Tabelle 3 sind für die sichtbaren Satelliten die einzelnen Komponenten, aus denen sich in diesem Modell der Pseudoabstand zusammensetzt, aufgeführt.

Tabelle 3: Komponenten der Pseudoabstandsgenerierung

PRN	wahrer Abstand SimU	Erdrotation Komp.	Satellit Uhrenabw.	EPT GNSS-4 Pseudorange	Differenz EPT - SimU
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
6	24473763,587	-23,342	1376,428	24414997,137	-35,209
12	20183979,652	3,786	72760,344	20053814,388	6,816
14	22785795,149	14,659	36073,294	22692354,699	-20,075
15	23845676,788	-0,205	-63481,010	23851691,423	64,281
17	23815333,307	-14,607	-40270,479	23798130,303	56,986
24	20361465,470	-4,207	-11296,660	20315334,393	21,641
25	22238237,741	16,370	4898,731	22175985,525	-32,036

In der Simulationsumgebung ist kein Atmosphärenmodell implementiert. Dies führt im Vergleich zu einer realen Messung zu den hier dargestellten charakteristischen Abweichungen, die in diesem Wertebereich erwartet wurden.

7.3.6 Galileo-railGATE-Pseudolitemgebung

Als ein Beispiel von alternativer Satellitennavigation wird die Pseudolitemgebung des Galileo-railGATE-Testzentrums (Abschnitt 3.3.3) in der Simulationsumgebung nachgestellt. An acht bis zu 60 Meter hohen Masten sind Pseudosatellitensender mit einer feststehenden Senderposition angebracht. Die Standorte der Pseudoliten (W1 bis W8) sind in Abb. 76 dargestellt und in Anhang B.6 als Koordinaten dokumentiert. Die Pseudolitenpositionen werden als alternatives Weltraumsegment anstelle der GNSS-Satelliten nach dem Modell in Abschnitt 5.13.6 verwendet.

In Abb. 114 sind die wahren Abstände des simulierten GNSS-4 Empfängers während der Fahrt auf dem Testring T1 aus dem in Abschnitt 7.1.1 beschriebenen Szenario dargestellt. Anders als bei der Messung von GNSS-Satellitensignalen sind die Entfernungen zwischen Sender und Empfänger sehr gering. Das Verhältnis zwischen maximalen und minimalen Abstand zu einem Pseudoliten ist jedoch sehr hoch.

Die Besonderheit der Messsignale besteht in der relativ schnellen Änderung des Azimutwinkels. Alle Pseudolitenantennen befinden sich immer oberhalb des künstlichen Horizontes. Aus dem Längenverhältnis von Abstand zu einem Pseudoliten und Höhenunterschied zwischen der Pseudolitenantenne und der Empfängerantenne ergeben sich sehr geringe Elevationswinkel von meist unter 3° Grad.

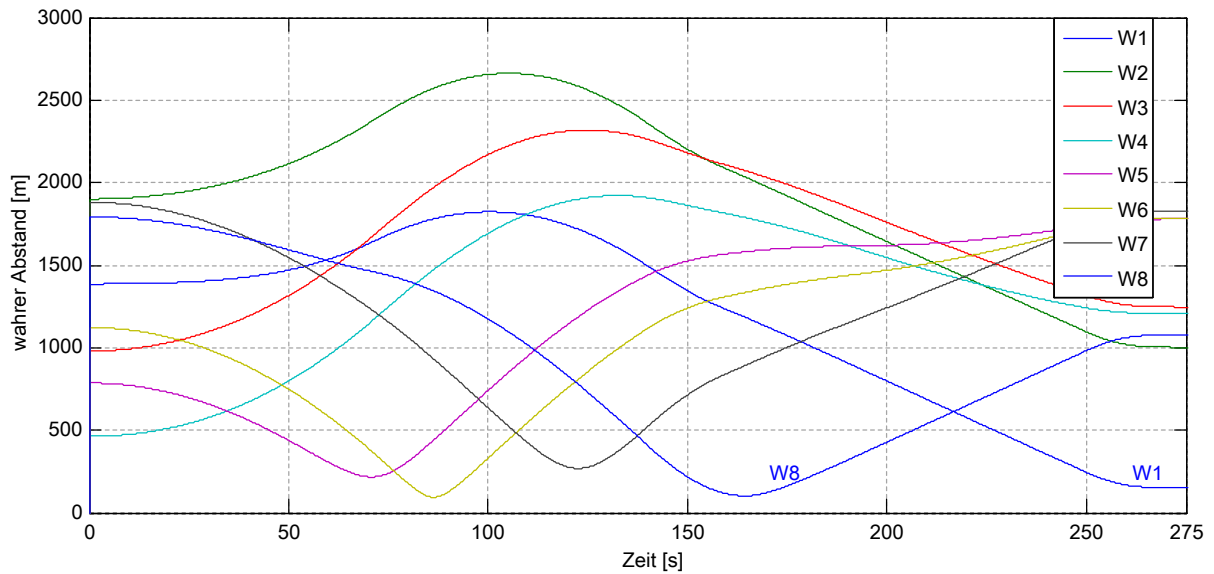


Abb. 114: Wahrer Abstand der SimU-GNSS-4 Antenne zu railGATE-Pseudolitenantennen

In Abb. 115 sind die Azimut- und Elevationswinkel der GNSS-4 Antennenposition zu den acht Pseudolitenantennen in einem NED-Koordinatensystem dargestellt. Es wird davon ausgegangen, dass alle Pseudoliten von dem GNSS-4 Empfänger empfangen werden.

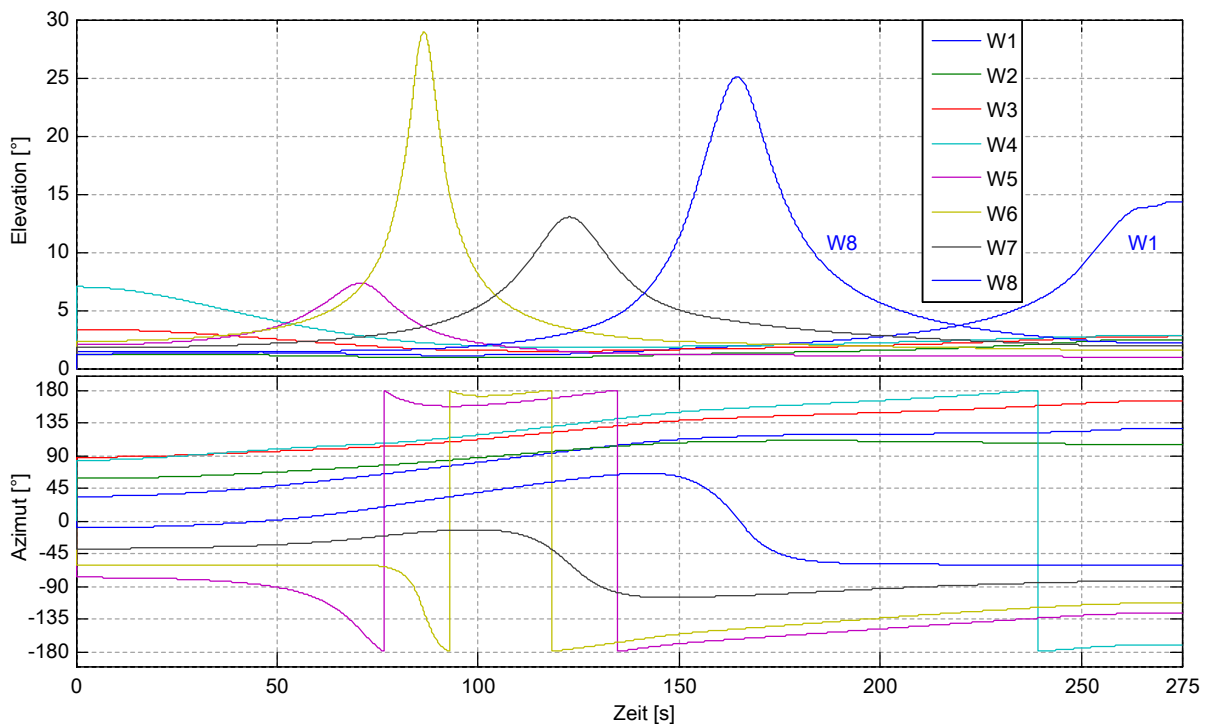


Abb. 115: Azimut- und Elevationswinkel der GNSS-4 Antenne auf dem Fahrzeug zu den stationären railGATE-Pseudolitenantennen

Ausgehend von diesem idealen Sensor-Physikmodell können darauf aufbauend das Störungsmodell nach Abschnitt 7.3.4 und das Technikmodell nach Abschnitt 7.2.4 angewendet werden. Die Funktionalität der Modelle wurde bereits in Abschnitt 7.3.4 gezeigt, sodass hier auf die Darstellung verzichtet wird.

7.4 Bewertung der Simulationsergebnisse

Das 7. Kapitel beschreibt anhand eines generischen Szenarios die Funktionalität der Simulationsumgebung und die Eigenschaften der Simulationsmodelle. Auf eine qualitative Bewertung der Simulationsergebnisse wurde bisher konsequent verzichtet und nur eine neutrale technische Beschreibung gegeben. In diesem Abschnitt werden nun die Ergebnisse bewertet und mit den Zielen, Erwartungen und dem Stand der Wissenschaft und Technik eingeordnet. So kommen in diesem Abschnitt keine neuen Ergebnisse hinzu, sondern die vorhandenen Informationen und Erkenntnisse werden kombiniert und gewertet. Die wichtigsten Ergebnisse werden hier durch Nennung hervorgehoben.

7.4.1 Basissoftware

Anknüpfend an die in Abschnitt 6.1 und 6.2 begonnene Beschreibung von Strukturen der Simulationsumgebung setzt Abschnitt 7.1 mit der Beschreibung eines zweiten Szenarios die Vorstellung der Grundfunktionalitäten der Simulationsumgebung fort.

Die Basissoftware der Simulationsumgebung mit der Ablaufsteuerung in MATLAB und dem Streckenatlas-Server erzeugt eine variable Automatisierung des Simulationsdurchlaufes. Die vollständige Automatisierung eines Simulationsdurchlaufes führt zu einer Entlastung des Benutzers, der sich auf die Modelle und Konfiguration konzentrieren kann. Benutzeraktionen während eines Simulationsdurchlaufes sind nicht notwendig. Das Zusammenspiel der verschiedenen Systeme in der Co-Simulationsstruktur wird so vom Benutzer ferngehalten. Die Struktur der Ablaufsteuerung und des Simulink-Zentralmodells haben sich über mehrere Jahre Entwicklungsarbeit bewährt. Anpassungen wurden überwiegend in der Konfiguration und im Postprocessing durch die Verarbeitung zusätzlicher Signale notwendig.

Die Bewegung des Schienenfahrzeuges wird in diesem Szenario über die vorgesehene Bewegungsvorgabe des ETCS-Systems und des Triebfahrzeugführer-Modells durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass aus der Vorgabe eines Fahrplanes mit der ETCS-Funktionalität und dem Fahrzeugmodell ein realistischer Bewegungsablauf erzeugt wird. Die Nutzung der ETCS-Funktionalität erzeugt realitätsnahe Systemstrukturen. Die Funktionalitäten und Rückwirkungen zwischen Fahrzeug-, Umgebungs- und Infrastruktursystemen lassen sich sehr gut abbilden.

Die Mehrkörpersimulation in SIMPACK wird ebenfalls vollautomatisiert in die Co-Simulation integriert. Der mechanische Fahrzeugaufbau des 5-Körper-Modells ist für die Untersuchung von Odometrieapplikationen sehr gut anwendbar. Der Benutzer kann sich auf die Konfiguration der Körper, Sensorpositionen und Schnittstelle konzentrieren, ohne höhere Mathematik anwenden zu müssen.

Das Simulink-Zentralmodell fasst die Fahrzeugkomponenten und Sensoriksimulation zusammen und enthält die Co-Simulationsschnittstellen zur Infrastruktur- und zur Mehrkörpersimulation. Die Modellstruktur bildet somit gut den betrachteten Teil der Eisenbahnstrukturen und die Verbindungen zur Umgebung ab. Die Vorteile der Simulationsprogramme werden durch die spezifischen Modellbeschreibungen genutzt.

Der Zustand der Infrastruktursysteme wird durch den Szenario-Live-Viewer als Webapplikation grafisch aufbereitet und gibt dem Benutzer einen guten Überblick über die Konfiguration und aktuellen Zustand der aktiven Simulation.

7.4.2 Sensoriksimulation

Der systematische Aufbau der Sensormodelle aus einem Physikmodell und einem Technikmodell mit einer Unterteilung in Sensormodell, Störungsmodell und Fehlermodell hat sich bei allen untersuchten Sensoren als anwendbar und vorteilhaft erwiesen. Die Strukturierung unterstützt die systematische Modellerstellung und grenzt die verschiedenen Eigenschaften des Sensors gut voneinander ab.

Dies wird besonders bei dem umfangreichen Radimpulsgebermodell deutlich. Dieses Modell erzeugt ein sehr realitätsnahes Sensorsignal. Mit dem Sensormodell konnte eine klare Modellstruktur mit einer übersichtlichen Beschreibung der aufeinander aufbauenden Teilmodelle erstellt werden. Die verschiedenen Störungseinflüsse von Schlupfeigenschaften bis Messrauschen und digitale Taktung werden integriert und mit den konfigurierten Fehlereinflüssen in einem komplexen Szenario kombiniert. Daraus lässt sich ein sehr umfangreiches Messszenario für diesen Sensor erstellen, der für einen Auswertalgorithmus eine vielseitige und sehr anspruchsvolle Situation erzeugt.

Ein weiteres auf das Distanzsignal bezogenes Sensormodell beschreibt die Funktionalität eines ETCS-Eurobalisenlesegerätes. Aus den Daten des Streckenatlas-Servers und der gefahrenen Distanz des Fahrzeuges werden die virtuellen Auslesungen von ETCS-Eurobalisen als einzelne Ereignisse ausgelöst. Daraus ergibt sich eine interessante Methode, distanzbasiert Wegmarken oder andere Elemente und Objekte entlang der Fahrstrecke auszulesen.

Die alternative Methode zur Auslesung von elektronischen Wegmarken anhand der absoluten Geoposition von Wegmarke und Antenne wird am Beispiel der

RFID-Wegmarken vorgestellt. Hier wird über eine erweiterte Methode ein komplexes Muster während der Überfahrt generiert. Dadurch lässt sich auch vor dem Erreichen und Aktivieren am Zielpunkt bereits ein realitätsnahes Signalverhalten generieren. Das Signalverhalten während einer Überfahrt über eine Hauptwegmarke und zwei Hilfswegmarken konnte mit einer realen Messung verifiziert werden. Die gemessene und simulierte Position der Hauptwegmarke stimmt sehr gut überein. Der Signalverlauf der Hilfswegmarken ist um maximal einen Schwellenabstand ($0,64\text{ m}$) versetzt. Das Rauschverhalten der RSSI-Werte ist stärker als in den Messungen, und mit der Diskretisierung wird ein sehr realistischer Signalverlauf erzeugt.

Eine kontinuierliche und absolute Positionsmessung wird durch einen funktional implementierten Satellitennavigationsempfänger realisiert. Das Sensor-Technikmodell erzeugt realistische NMEA-Botschaften und einen auf die Zeitbasis UTC synchronisierten Zeitpuls ähnlich den digitalen Messsignalen, wie sie auch von einem realen Empfänger ausgehen werden.

Die Besonderheit der Simulationsumgebung, dass direkt absolute Geopositionen und Zeitpunkte erzeugt werden, wird für die RFID- und Satellitennavigations-Sensormodelle genutzt. Dies ist eine deutliche Erweiterung gegenüber einer reinen Simulink- oder Mehrkörpersimulation.

Beschleunigungs- oder IMU-Sensoren sind meist recht einfach (mechanisch) zu montieren, stellen aber durch Störeinflüsse (z.B. Verdrehung, Rotationseffekte, Gravitation, Erdrotation, Rauschen, Offset- und Verstärkungsänderungen) hohe Anforderungen an die Signalverarbeitung von Navigationsanwendungen. Dreidimensionale Sensorik weist eine starke Verbindung zur Gleisachse, Fahrzeugaufbau und Bewegungsprofil auf. Dies macht die einzelne Generierung von konsistenten Messsignalen durch Signalgeneratoren sehr schwierig. Das Sensormodell erzeugt ein konsistentes Sensorsignal in allen drei Raumrichtungen für die Messkanäle Beschleunigung, Winkelgeschwindigkeit und Erdmagnetfeld. Häufig werden die systematischen und stochastischen Störeinflüsse in Messanwendungen durch aufwendige Filter und Kombinationen mit weiteren Sensoren (z.B. Satellitennavigation) geschätzt. Mit dem vorgestellten Sensormodell können die Odometriealgorithmen sehr komplexen, aber konsistenten realistischen Szenarien ausgesetzt, entwickelt und überprüft werden. Da die idealen Sensorsignale vorhanden sind, ist eine Überprüfung der geschätzten Sensorsignale sehr gut möglich.

7.4.3 Satellitennavigation-Simulation

Zur Generierung von GNSS-Messdaten, wie sie ein GNSS-Empfänger zur Verfügung stellt, wurde ein funktionaler Modellierungsansatz gewählt, der die physikalischen und technischen Eigenschaften der Satellitennavigationssysteme beschreibt, jedoch auf die Modellierung von Hochfrequenzeigenschaften verzichtet. Die Simulationsumgebung hat im Umgebungsmodell einen absoluten Raum- und Zeitbezug, sodass ein GNSS-Weltraumsegment und GNSS-Benutzersegmente als konzentrierte Modelle integriert werden können. Die bei einer realen Anwendung zu erwartenden systematischen und stochastischen Effekte wurden in dem Modell implementiert. Mit einem Störungs- und Fehlerszenario wurde ein komplexes und sehr anspruchsvolles Szenario für einen Auswertealgorithmus implementiert. Die Berechnung der Empfangsparameter und die Schätzung der Störeinflüsse durch Odometriealgorithmen kann in Kombination mit dem Schienenfahrzeug und schienenfahrzeugspezifischer Sensorik getestet werden. In realen Messungen müssen die Empfangs- und Störungsparameter selbst geschätzt werden, und die Messungen lassen sich nicht wiederholen. Gegenüber konventionellen GNSS-Messungen und daran angewendeten Algorithmenentwicklungen bietet die Simulationsumgebung mit diesem Modell somit einen deutlichen Vorteil.

Die einzelnen Teile des Weltraum- und Benutzersegmentes werden vorgestellt und deren Signale zu idealen und realistischen Sensorsignalen kombiniert. Die Rohdaten eines GNSS-Empfängers können systematisch für ein Eisenbahnszenario generiert werden. Wie schon in Kapitel 6 werden die generierten und während einer realen Messfahrt auf dem IFS-Erprobungsträger gemessenen Pseudoabstände miteinander verglichen. Die Validierung zeigt eine gute Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit den Messungen. Die in Abschnitt 7.3.5 gezeigten Abweichungen entsprechen den zu erwartenden Atmosphäreneinfluss. Ein Atmosphärenmodell wurde aufgrund der ungenauen Modellvorstellungen und fehlender Messdaten aus der realen Messfahrt nicht implementiert.

Die Reproduzierbarkeit eines Positionsverlaufes ist für das in Kapitel 7 verwendete Szenario am GNSS-3 Sensor deterministisch. Die Wiederholgenauigkeit ist als interessante Eigenschaft für die Algorithmenoptimierung einzuschätzen. Bei konstanten und reproduzierbaren Umgebungsbedingungen können die Auswirkungen von Algorithmenänderungen eindeutig verglichen werden. Hingegen lassen sich in realen Versuchsfahrten mit einem Schienenfahrzeug das Fahrprofil und der exakte zeitliche Verlauf einer Testfahrt nur schwer reproduzieren. Im Zusammenhang mit Satellitennavigation sind identische Versuchsbedingungen praktisch nicht möglich, sodass die Simulationsumgebung eine große Erweiterung der Untersuchungsmöglichkeiten bietet.

Der systematische Aufbau der Simulationsumgebung ermöglicht die Implementierung neuer absolut messender Sensorsysteme wie die Galileo-railGATE-Pseudolitenumgebung. Die Systemeigenschaften lassen sich ohne Änderung der anderen Modelle in die Simulationsumgebung integrieren.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Im ersten Teil dieses Kapitels wird der Inhalt dieser Arbeit zusammengefasst und abschließend diskutiert. Daran schließt ein Ausblick mit interessanten Anwendungen und Erweiterungen der vorgestellten Simulationsumgebung an.

8.1 Zusammenfassung und Diskussion

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer allgemeinen Simulationsstruktur für ein Schienenfahrzeug, in der funktional das System Eisenbahn und Nichteisenbahnumgebungen in einer gemeinsamen Simulationsumgebung verwendet werden. In dieser kombinierten Schienenfahrzeug-, Eisenbahninfrastruktur- und Umgebungssimulation wird eine Programm- und Modellstruktur angelegt, die alle grundlegenden Systembestandteile des Eisenbahnverkehrs umfasst. Je nach Aufgabenstellung werden die Systembestandteile mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad und Implementierungen modelliert. Dadurch entsteht eine universelle Systemstruktur mit einem großen Anwendungs- und Adaptionbereich, in die viele Eisenbahnanwendungen integriert werden können. Von diesem universellen Simulationsansatz und Simulationsstruktur ausgehend können neue Technologien (hier Satellitennavigation für eine Odometrie-anwendung) im Eisenbahnsystem simuliert werden, um deren Eigenschaften und Rückwirkungen zu untersuchen.

Die unterschiedlichen Teile der Simulationsumgebung werden in verschiedenen Simulationsprogrammen modelliert und zur Simulationszeit über Co-Simulationschnittstellen miteinander gekoppelt. In der Programmstruktur der Simulationsumgebung ist eine Szenariosteuerung implementiert, die den Simulationsablauf vollständig konfigurierbar automatisiert. Die Simulationsprogramme und -server werden mit den konfigurierten Modellen automatisiert gestartet und beendet.

Das Simulink-Zentralmodell umfasst die signalbasierten Modelle ETCS-Fahrzeugausrüstung, Fahrermodell, Fahrzeugtechnik, eindimensionales Bewegungsmodell, Sensormodelle und das GNSS-Weltraumsegment. Zustands-, objekt- und ereignisbasiert wird die Eisenbahninfrastruktur in einer Python-Anwendung simuliert und mit ETCS-Botschaften über Ethernet mit der ETCS-Fahrzeugausrüstung im Simulink-Zentralmodell gekoppelt. Die dreidimensionale Bewegung des Schienenfahrzeuges, das als Starrkörpermodell modelliert ist, wird in dem Mehrkörper-

simulationsprogramm SIMPACK durchgeführt und über eine Co-Simulationschnittstelle ebenfalls mit dem Simulink-Zentralmodell gekoppelt.

Der Streckenatlas-Server erzeugt aus einer Gleisnetzdefinition und einem Fahrplan automatisch die zu fahrende Strecke, konfiguriert die Infrastrukturserver Leitstelle und Stellwerk und generiert für die angeschlossenen Programme, z.B. SIMPACK, die programmspezifische Streckendefinition. Komplexe Situationen lassen sich so durch die im Eisenbahnbereich üblichen Konfigurationen, also aus Fahrplan und Gleisatlas, sowie durch das Zusammenwirken der Systembestandteile übersichtlich und systematisch erzeugen. Der komplexe Vorgang der Streckengenerierung wird in der Simulationsumgebung auf Basis von Trassierungs- und Fahrplänen in dem standardisierten Datenformat railML durchgeführt. Daraus ergibt sich ein großes Potenzial der Automatisierung von Fahrbewegungen zur Darstellung komplexer Simulationsszenarien.

Die aktiven Infrastruktursysteme Leitstelle und Stellwerk werden als Grundstruktur angelegt, sodass eine signalgeführte Fahrt des simulierten Schienenfahrzeuges möglich ist. Als Zugleit- und Sicherungssystem wurde ERTMS/ETCS gewählt. Die ETCS-Streckenzentrale ist mit dem Infrastruktursystemen und dem ETCS-Fahrzeugsteuergerät verbunden. Über diese Systeme wird die Bewegung des simulierten Fahrzeuges vollständig gesteuert.

Ausgehend von einer Eisenbahnsimulation aus Infrastruktur- und Schienenfahrzeugsimulation wird die Simulationsumgebung um eine allgemeine Umgebungsdefinition mit absolutem Raum- und Zeitbezug erweitert. Darin werden der Fahrweg und die Bewegung des Schienenfahrzeuges in einem absoluten erdfesten Koordinatensystem ECEF des WGS84-Datums definiert. Dies macht komplexe geometrische Zusammenhänge zwischen dem Schienenfahrzeug und der Umgebung in einer konsequenten Systematik beherrschbar. Die Nutzung derselben lokalen Koordinatensystemdefinitionen auf dem realen Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ und in der Simulationsumgebung erzeugt eine durchgängige Modelldefinition und eine systematische Verbindung zwischen Messdaten und Simulationsdaten. Die Simulationszeit wird einer eindeutigen Uhrzeit zugeordnet, der koordinierten Weltzeit UTC.

In dem Fahrzeugmodell wird die Grundstruktur eines Schienenfahrzeuges und dessen Fahrzeugausrüstung in Funktionsmodulen beschrieben. Der Zustand und die Informationen des ETCS-Fahrzeugsteuergerätes werden signalbasiert als quasivisuelle Informationen von dem ETCS-Anzeigegerät an das Fahrermodell weitergeleitet. Das Fahrermodell verarbeitet die Informationen und gibt seine Entscheidungen in Form von Stellbefehlen eines virtuellen Fahrerpultes an das Zentralsteuergerät weiter. Das Zentralsteuergerät bearbeitet alle zentralen Steuerungs- und Organisationsaufgaben.

Aus dem Fahrerwunsch, dem Fahrzeugzustand und möglichen Notbremsanforderungen wird eine Traktions- und Bremsanforderung an das Fahrzeugtechnikmodell gesendet. Das Fahrzeugtechnikmodell umfasst das Antriebs- und Bremsmodell und erzeugt eine eindimensionale Bewegung des Schienenfahrzeuges entlang des Fahrweges.

Über eine Co-Simulationsschnittstelle werden die eindimensionale Bewegung des Schienenfahrzeuges an eine Mehrkörpersimulation übergeben und die dreidimensionalen Positions- und Bewegungsdaten von der Mehrkörpersimulation erzeugt. Das Mehrkörpermodell hat die geometrischen und kinematischen Eigenschaften des Referenzfahrzeuges „IFS-Erprobungsträger 1“. Durch Marker an den Körpern wird die Bewegung der Fahrzeugbauteile und Sensoren gemessen.

Aus allen physikalischen Informationen der Simulationsmodelle werden im Sensor-Fehler-Modell realistische Sensorsignale erzeugt, wie sie auch auf dem realen Versuchsfahrzeug auftreten. In einer neu entwickelten Modellsystematik werden die physikalischen und technischen Modelleigenschaften aufeinander aufbauend ideal, gestört und fehlerbehaftet erzeugt.

Als Werkzeug zur Entwicklung GNSS-erweiterter Odometrieapplikationen werden mehrere Sensormodelle mit absolutem Raumbezug vorgestellt. Das Auslesen von Wegmarken mit einer festen Kilometrierung oder einer Geoposition wird durch zwei Sensormodelle umgesetzt. Das Inertialsensorik-Sensormodell beschreibt die translatorische und rotatorische Bewegungsänderung von einer Sensorposition gegenüber einem ortsfesten Bezugssystem. Eine kontinuierliche absolute Positions- und Bewegungsmessung wird durch ein funktionales Satellitennavigationsmodell des GNSS-Benutzersegmentes erzeugt. In einem weiteren Satellitennavigationsmodell wird durch die Simulation des GNSS-Weltraumsegmentes und des GNSS-Benutzersegmentes die funktionalen Rohdaten aus wahren Abständen und Pseudoabständen simuliert. Aus dem absoluten Raumbezug des Satellitennavigationssystems werden systematisch alle Positionen auf ein erdfestes Referenzkoordinatensystem ECEF des WGS84-Datums bezogen. Zur Synchronisierung des GNSS-Weltraumsegmentes mit dem GNSS-Benutzersegment auf dem Schienenfahrzeug wird als absolute Zeitdefinition die koordinierte Weltzeit UTC für alle zeitlichen Beschreibungen verwendet. Als ein Spezialfall mit feststehenden Satellitensenderpositionen wurde die Galileo-Satellitennavigation-Testumgebung „railGATE“ mit einer Pseudolitenanlage in der Simulationsumgebung implementiert.

Mit dem Szenario-Live-Viewer wird eine benutzerfreundliche Weboberfläche geschaffen, die den aktuellen Zustand des Simulationsszenarios und der Simulation für den Benutzer übersichtlich darstellt. Als Kartenhintergrund sind OpenStreetMap.org

oder andere Karten- und Luftbilddienste darstellbar. Mit dem Umschalten der Betriebsstellen (zur Fahrtfreigabe) per Computermouse besteht eine erste Anwendung, um Benutzeraktionen von der Weboberfläche direkt in die aktive Simulation zu übernehmen. Die Weboberfläche kann als moderne Benutzerschnittstelle mit gängigen Webtechnologien wie HTML, JavaScript, Python, ... flexibel erweitert werden.

Mit der automatisierten Szenariogenerierung als einem separaten Programmpaket wird die Trassierung mehrerer Gleisnetze als MATLAB-Datenstruktur und im railML-Format erstellt.

Die Simulationsumgebung wird auf einer Teststrecke validiert, indem man eine Messung des Referenzfahrzeuges „IFS-Erprobungsträger 1“ mit der Simulation vergleicht. Die Eigenschaften und Funktionalität der Simulationsumgebung werden in einem Simulationsszenario nachgewiesen.

Als ein Entwicklungswerkzeug zur Algorithmenentwicklung bietet die Simulationsumgebung die identischen Softwareschnittstellen für Sensorsignale an wie auf dem Referenzfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“.

Durch den hohen Automatisierungsgrad der Simulationsumgebung nimmt der Benutzer bei der Nutzung der Simulationsumgebung statt einer sonst programmierenden Rolle nun stärker eine konfigurierende und überwachende Rolle ein.

Fazit:

Simulationen haben die Möglichkeiten der Entwicklung von Eisenbahninfrastruktur und Schienenfahrzeugen in den vergangenen Jahrzehnten deutlich geprägt. Die Simulationen können immer komplexere Situationen darstellen, und es werden immer komplexere Fragestellungen mit Simulationen untersucht. In dieser Arbeit wird eine Simulationsumgebung vorgestellt, die Infrastruktursimulation, Schienenfahrzeugsimulation und Umgebungssimulation miteinander kombiniert. Die Erweiterung einer rein fahrzeugbezogenen Sicht zu einer integrierten Sichtweise von Schienenfahrzeug, Infrastruktur und Navigation bietet neue Möglichkeiten der Funktionsentwicklung. Die sich daraus ergebenden Möglichkeiten, komplexe Wechselwirkungen zwischen Eisenbahnsystemen und Umgebung zu untersuchen, wird am Beispiel der Odometriesensorik mit Satellitennavigation gezeigt.

8.2 Ausblick

Aufbauend auf dem in dieser Arbeit gezeigten Ausbauzustand der Simulationsumgebung ergeben sich viele Erweiterungs- und Variationsmöglichkeiten, die dieser Abschnitt zusammenfasst.

Der hier beschriebene Ansatz geht davon aus, dass es eine allgemeine Struktur der Simulationsumgebung gibt, die sich an der funktionalen Struktur realer Systeme orientiert und sich nicht auf den für einen Anwendungsfall minimal erforderlichen Funktionsumfang beschränkt. Reale Funktionsstrukturen werden vorteilhaft nachgebildet, und mögliche Konflikte können aus der Struktur heraus erkannt werden. Dieser Ansatz nutzt das vorhandene Know-how und ist den verwendeten Technologien aktuell eingesetzter Systeme näher. Tiefere Analysen von einzelnen Komponenten können durch Detailimplementierungen von existierenden Modulen ohne Änderung der Simulationsarchitektur oder Schnittstellen durchgeführt werden. Durch die Verwendung von standardisierten Schnittstellen besteht die Möglichkeit, reale Systeme in Hardware-in-the-Loop- (HiL-) oder Software-in-the-Loop- (SiL-) Architekturen mit der Simulationsumgebung zu koppeln.

Für die Implementierung der Basisfunktionalität einer solchen Simulationsumgebung ist ein erhöhter Aufwand nötig. Die grundlegenden Modellstrukturen müssen über mehrere Technikbereiche herausgearbeitet werden. Die Entwicklung einer verallgemeinerten Programmstruktur, in der alle Parameter der Simulation konfiguriert werden können, ist anspruchsvoll. Hierfür muss eine klare Struktur mit flexiblen Elementen erstellt werden. Für die Anwendung und Weiterentwicklung eines solchen komplexen Simulationswerkzeuges sind eine Einarbeitung und eine systematische Arbeitsweise notwendig. Mit einer universellen Programm- und Modellstruktur ergeben sich jedoch neue Möglichkeiten einer effizienten Simulation komplexer Systemzustände.

Mit der Basisfunktionalität der Simulationsumgebung liegt ein (z.B. zu Projektbeginn) vorhandenes Grundsystem vor, in dem viele Funktionen, die für jede Simulation benötigt werden, schon in einem ausgereiften Entwicklungszustand zur Verfügung stehen. Über mehrere Simulationsprojekte hinweg werden die einzelnen Basisfunktionalitäten weiterentwickelt. Dabei können sich verschiedene Schnittstellen und Hilfsfunktionalitäten bewähren, z.B. die automatisierte Streckengenerierung. Sie steigern die Effizienz bei der Bearbeitung wissenschaftlicher Themen. Der Wissenstransfer zwischen aufeinander folgenden Projekten wird verbessert. Ein nachhaltiger Technologie- und Know-how-Aufbau wird in dieser Struktur unterstützt.

Durch die Anbindung weiterer Simulationsprogramme ist die Simulationsumgebung durch Co-Simulationsschnittstellen flexibel erweiterbar. So werden Einschränkungen oder Unzulänglichkeiten einzelner Simulationsprogramme überwunden und die

Stärken von spezialisierten Simulationsprogrammen genutzt. Die für spezielle Technikbereiche übliche Software mit bereits vorhandenen Modellen kann wiederverwendet werden. Dies reduziert den Implementierungsaufwand, stärkt die Zusammenarbeit und das gegenseitige Verständnis zwischen Fachbereichen und erhöht die technische Integration in einem Entwicklungsprozess.

Mit dieser Simulationsumgebung soll ein Schritt in Richtung virtueller Fahrzeugtests und vollständig digitalisierter Fahrzeugentwicklung gegangen werden. Mit der Simulationsumgebung lässt sich zeigen, dass die Struktur des Eisenbahnsystems in einer Co-Simulationsumgebung abbildbar ist. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, die Simulationsumgebung stärker in den Entwicklungsprozess eines Fahrzeuges einzubeziehen. Bisher werden Simulationsmodelle per Hand direkt erstellt. Eine Verbindung zwischen der konventionellen Planung mithilfe von CAD und von Simulation bzw. Test kann in der automatisierten Erstellung von Simulationsmodellen bestehen. Durch den automatisierten Übergang von digitalen Planungsunterlagen (Mechanik, Elektrik, Mechatronik, Multi-Physik) in Simulationsmodelle können Planungsunterlagen früher für Tests nutzbar gemacht werden. Planungsunterlagen werden dann nicht nur durch „konzentriertes Hinsehen“ geprüft, sondern können mit einer automatisierten Modellgenerierung ohne hohen Arbeitsaufwand auch in definierten Test- und Belastungssituationen getestet werden. Dies schafft auch in der mechanischen Konstruktion und bei der Entwicklung der Fahrzeugtechnik neue Möglichkeiten in der Organisation der Fahrzeugentwicklung. Agile Methoden mit sehr kurzen Entwicklungsphasen, wie sie in der Softwareentwicklung üblich sind, können durch eine Werkzeugkette zum schnellen Testen auch in konventionellen Entwicklungsbereichen eingeführt werden. Eine automatisierte Simulationsumgebung, die eine Eisenbahnumfeld- und eine Umgebungssimulation bietet, ist ein wichtiger Baustein für diese Entwicklung.

8.3 Weitere Vorschläge zur Anknüpfung an diese Arbeit

Im folgenden Abschnitt werden zu einzelnen Teilen und Aspekten der Simulationsumgebung weitere Vorschläge zur Anknüpfung an diese Arbeit zusammengefasst.

Die Infrastruktursimulation ist zurzeit auf eine Zugfahrt ausgerichtet. Eine Erweiterung auf mehrere Zugfahrten und Schienenfahrzeuge zu komplexen Fahrbewegungen auf einem Gleisnetz erscheinen interessant. So können neue Betriebsverfahren in mikroskopischen Betriebssimulationen, z.B. durch kooperative Rangiervorgänge mit mehreren Loks und Waggons, untersucht werden.

Das Fahrermodell kann durch eine Vielzahl von in der Literatur beschriebenen Triebfahrzeugführer-Eigenschaften und -Handlungsmodellen von automatischen Bedienhandlungen bis zu autonomen Situationseinschätzungen und Entscheidungen über

Bedienhandlungen erweitert werden. Auch die Integration von Leit- und Assistenzsystemen, z.B. EBUla (Elektronischer Buchfahrplan und Langsamfahrstellen), AFB (Automatische Fahr- und Bremssteuerung) oder andere ATO-Systeme (Automatic Train Operation), erscheint interessant.

Die Fahrzeugtechnik ist mit energieflussbasierten Simulationen sehr detailliert zu simulieren und kann beispielsweise über Modelica und FMI an das Simulink-Zentralmodell gekoppelt werden.

Ein detailliertes Fahrzeugtechnikmodell, das die auf einem Schienenfahrzeug vorhandenen Aggregate in seinen Schnittstelleneigenschaften vollständig abbildet, kann mit der Implementierung des Zentralsteuergerätes gekoppelt werden. So lassen sich eine virtuelle Fahrzeugausstattung und die Ablaufsteuerung des Zentralsteuergerätes in komplexen Situationen in der Simulationsumgebung auf Implementierungsfehler und energetische Optimierung untersuchen.

In der Simulationsumgebung sind mehrere Mehrkörpermodelle des Referenzfahrzeuges implementiert worden. Für die Simulation anderer Schienenfahrzeuge oder ganzer Züge können die Fahrzeugmodelle ersetzt werden.

Die durch einen IMU-Sensor messbaren Schwingungen durch Fahrweganregungen, Eigenmoden der Fahrzeugteile oder durch Dieselmotoren sind bei realen Messungen Untersuchungsgrößen oder zu beachtende Störgrößen. Die Eigenschaften können durch Erweiterung der Fahrzeugmodelle und des Sensormodells in der Simulationsumgebung erzeugt werden.

Die Implementierung von Ausrundungen im Gradientenprofil würde die stoßartigen Anregungen, die bei einem Gradientenwechsel im IMU-Modell (Abschnitt 7.2.5, Abb. 104) zu unrealistischen Schwingungen führen, vermeiden.

In Kapitel 6 hat sich gezeigt, dass die Genauigkeit der benutzten Ortungsverfahren zur Positions- und Bewegungsmessung mit den vorhandenen Sensoren auf dem IFS-Erprobungsträger noch deutlich verbessert werden kann. Mit den Diplomarbeiten von Dering [163] und Dollmann [164] wurden hier erste Ansätze erarbeitet, die in der Simulationsumgebung und an Messungen weiterentwickelt werden können.

Die Simulationsumgebung erscheint zur Entwicklung von Algorithmen mit absoluten Positionsinformationen durch Satellitennavigation und Wegmarken, wie von Rütters [91] beschrieben, als eine vorteilhafte Werkzeugkette.

Die Untersuchung von Odometriealgorithmen und deren Robustheit gegenüber Traktions- und Bremschlupf wurde an einer Mehrkörpersimulation von Allotta [117] gezeigt. Die Nutzung von Inertialsensorik und Satellitennavigation für ein erweitertes Odometriesystem wäre eine vorteilhafte Anwendung dieser Simulationsumgebung.

Im Rahmen einer Echtzeitsimulation können Teile der Simulationsumgebung auf dem Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ ausgeführt werden. Es wurde bereits gezeigt, dass die Infrastruktursimulation und die Kopplung über das ETCS-System zur Bewegungssteuerung des IFS-Erprobungsträgers auf Testfahrten eingesetzt werden kann. Darauf aufbauend können auf dem RCP-System weitere in der Simulationsumgebung implementierte Modelle in einer Echtzeitsimulation ausgeführt werden. Insbesondere neue Sensorik, z.B. das Galileo-Satellitennavigationssystem oder virtuelle ETCS-Balisen, könnten auf einer Messfahrt dem real gemessenen Sensorset hinzugefügt werden. Ebenso ist die Nutzung der Störungs- und Fehlermodelle auf dem Fahrzeug interessant.

Eine interessante Erweiterung der Simulationsumgebung wäre die Anwendung als Echtzeit-Umgebungssimulation für Hardware-in-the-Loop-Prüfstände.

Im Rahmen des openETCS-Projektes ist seit 2015 eine Referenzimplementierung des ETCS-Fahrzeugsteuergerätes verfügbar. Da die funktionalen Schnittstellen vorhanden sind, wäre die Nutzung der Referenzimplementierung als Alternative zu der funktionalen Implementierung möglich und sehr vorteilhaft.

Die Betriebssimulation BEST ist seit Jahrzehnten eine anerkannte Simulationsumgebung für die Eisenbahninfrastruktur [40]. Die Kopplung der infrastrukturorientierten Simulation BEST mit der fahrzeugorientierten Simulationsumgebung erscheint zur Simulation komplexer Szenarien interessant.

Die Erzeugung von charakteristischen Störungen für mehrdimensionale Sensormodelle ist durch mehrfache eindimensionale Störsignale möglich. Die Erweiterung des eindimensionalen Störungsmodells durch mehrdimensionale Störungsmodelle ist sinnvoll. So könnte ein GNSS-Signal eines Satelliten durch dreidimensional modellierte Gebäude verdeckt sein, auch könnten GNSS-Signale reflektiert werden [118].

In der Simulationsumgebung werden reale Trassierungen zur Erzeugung des Gleisnetzes und des Fahrweges verwendet. Hierfür ist eine Werkzeugkette zur Erzeugung der komplexen Datenstrukturen entstanden. In den meisten Veröffentlichungen werden sehr einfache Trassierungen wie Gerade, Gerade mit Bogen oder S-Kurve mit Geraden angenommen. Realistischere Simulationsergebnisse lassen sich bei der Simulation eines Schienenfahrzeuges auf realitätsnahen Streckenprofilen erzeugen. Die manuelle Beschreibung der Trassierung ist aber noch ein aufwendiger Arbeitsprozess. In der Masterarbeit von Schütz [119] wird ein Trassierungswerkzeug vorgestellt, das in einer benutzerfreundlichen Schnittstelle die Eingabe der Trassierung erleichtert. Die Daten werden durch ein Modell der Oberbaurichtlinien geprüft und automatisiert eine SIMPACK-Streckendefinition erzeugt. Es erscheint vorteilhaft, die Trassierungswerkzeuge zu koppeln.

9 Verzeichnisse und Angaben

In diesem Kapitel werden alle organisatorischen Angaben zu dieser Arbeit zusammengefasst. Es beginnt in Abschnitt 9.1 mit den Literaturverzeichnissen. Daran schließen sich in Abschnitt 9.2 die Symbolverzeichnisse an. Das Abbildungsverzeichnis befindet sich in Abschnitt 9.3. Der Abschnitt 9.4 enthält das Tabellenverzeichnis. Das Kapitel schließt in Abschnitt 9.5 mit Anmerkungen.

9.1 Literaturverzeichnisse

Das Literaturverzeichnis ist zur besseren Übersicht in fünf Abschnitte aufgeteilt. Das konventionelle Literaturverzeichnis mit den referenzierten Literaturquellen ist im ersten Abschnitt 9.1.1 aufgeführt. Die Veröffentlichungen des Autors sind in Abschnitt 9.1.2 zur Übersicht zusammengestellt. Die vom Autor während seiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter an Institut für Schienenfahrzeuge und Fördertechnik (IFS) der Universität RWTH Aachen betreuten studentischen Arbeiten sind anschließend in Abschnitt 9.1.3 vollständig dokumentiert.

9.1.1 Literaturangaben

- [1] Fenner, W., Naumann, P. u. Trinckauf, J.: Bahnsicherungstechnik. Steuern, Sichern und Überwachen von Fahrwegen und Fahrgeschwindigkeiten im Schienenverkehr. Erlangen: Publicis Corporate Publ 2003
- [2] Theeg, G. (Hrsg.): Railway signalling & interlocking. International compendium. Hamburg: Eurailpress 2009
- [3] Winter, P.: Compendium on ERTMS. European rail traffic management system. Hamburg: Eurailpress 2009
- [4] Maschek, U.: Sicherung des Schienenverkehrs. Grundlagen und Planung der Leit- und Sicherungstechnik. SpringerLink: Bücher. Wiesbaden: Springer Vieweg 2013
- [5] Set of specifications #1 (ETCS baseline 2 and GSM-R baseline 0). <http://www.era.europa.eu/Core-Activities/ERTMS/Pages/Set-of-specifications-1.aspx>, abgerufen am: 28.10.2015
- [6] Set of specifications #2 (ETCS baseline 3 and GSM-R baseline 0). <http://www.era.europa.eu/Core-Activities/ERTMS/Pages/Set-of-specifications-2.aspx>, abgerufen am: 28.10.2015

- [7] Stanley, P. (Hrsg.): ETCS for engineers. Hamburg: Eurailpress 2011
- [8] Renz, H.-W. u. Mutz, M.: Kopplung Stellwerk / Zugsicherung mit neuer hochverfügbarer Schnittstelle. SIGNAL + DRAHT 99 (2005) 12, S. 35–39
- [9] Schulz, O.: Entwurf und Analyse sicherheitsrelevanter Kommunikationsarchitekturen, Universität Bremen Dissertation. Bremen 2011
- [10] Kanis, K., Lisker, A. u. Mehlhorn, L.: Erste Inbetriebnahme von über Internet Protokoll angesteuerten Feldelementen. SIGNAL + DRAHT 108 (2014) 6, S. 19–23
- [11] Hase, K.-R.: openETCS: Ein internationales ITEA2-Projekt begleitet den Wandel zu mehr Transparenz. ZEVrail 137 (2013) Tagungsband "Moderne Schienenfahrzeuge" Graz 2013, S. 182–187
- [12] Hammerl, M., Feldmann, F., Rumke, A. u. Pelz, M.: Studien zu menschlichen Einflussfaktoren im Eisenbahnsystem. Ein erweitertes Labor für Eisenbahn- und Führerstandssimulationen ermöglicht die Untersuchung der Mensch-Maschine-Interaktion am Lokführerarbeitsplatz. EI - Der Eisenbahningenieur 61 (2010) 5, S. 46–48
- [13] DIN EN 61375-1:2015-02 (IEC 61375-1:2012). *Elektronische Betriebsmittel für Bahnen - Zug-Kommunikations-Netzwerk (TCN)*. <http://www.beuth.de/de/norm/din-en-61375-1/225424944>, abgerufen am: 20.04.2017
- [14] Ganz, R. E. u. Kolbe, W. A.: Speed and Distance Unit (SDU) als Kernstück moderner fahrzeugseitiger Hochgeschwindigkeits-ETCS Lösungen. ZEVrail Glasers Annalen 129 (2005) Tagungsband Schienenfahrzeugtagung Graz 2005, S. 275–281
- [15] Betriebsanleitung HS22 mit PP2 Endstufe, Impulsgeber mit Hall-Sensoren 4AB1256/C-de, DEUTA-WERKE GmbH, Bergisch-Gladbach 2017
- [16] Resnik, B. u. Bill, R.: Vermessungskunde für den Planungs-, Bau- und Umweltbereich. Heidelberg: Wichmann 2009
- [17] Flacke, W. u. Kraus, B.: Koordinatensysteme in ArcGIS. Praxis der Transformationen und Projektionen. ESRI ArcGIS. Norden, Halmstad: Points 2003
- [18] NATIONAL GEOSPATIAL-INTELLIGENCE AGENCY (NGA), DEPARTMENT OF DEFENSE: WORLD GEODETIC SYSTEM 1984. Its Definition and Relationships with Local Geodetic Systems. Version 1.0.0 NGA.STND.0036_1.0.0_WGS84, 2014. http://earth-info.nga.mil/GandG/publications/NGA_STND_0036_1_0_0_WGS84/NGA.STND.0036_1.0.0_WGS84.pdf, abgerufen am: 11.12.2015
- [19] Witte, B. u. Sparla, P.: Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen. Berlin [u.a.]: Wichmann 2015

- [20] Niemeier, W.: Ausgleichungsrechnung. Statistische Auswertemethoden. De Gruyter Lehrbuch. Berlin [u.a.]: de Gruyter 2008
- [21] Mansfeld, W.: Satellitenortung und Navigation. Grundlagen, Wirkungsweise und Anwendung globaler Satellitennavigationssysteme; mit 65 Tabellen. Praxis. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2010
- [22] Farrell, J.: Aided navigation. GPS with high rate sensors. Electronic engineering. New York: McGraw-Hill 2008
- [23] Wendel, J.: Integrierte Navigationssysteme. Sensordatenfusion, GPS und Inertiale Navigation. München: Oldenbourg 2011
- [24] Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. u. Wasle, E.: GNSS - Global Navigation Satellite Systems. GPS, GLONASS, Galileo and more. Wien, New York: Springer 2008
- [25] Seeber, G.: Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications. Berlin [u.a.]: de Gruyter 2003
- [26] Wikipedia: Bahnelement. Datei: BahnelementeEllipse.svg. Ersteller: Modalanalytiker. Lizenz: CC BY-SA 3.0, 2015. <https://de.wikipedia.org/wiki/Bahnelement>, abgerufen am: 04.11.2015
- [27] Kettner, M., Sewcyk, B. u. Hunold, J.: Verknüpfung von mikroskopischen und makroskopischen Simulationsmodellen des Schienenverkehrs. EI - Der Eisenbahningenieur 55 (2004) 2, S. 6–11
- [28] Scheier, B.: Eisenbahnbetriebssimulationen. Ein Vergleich der Tools OpenTrack und RailSys, Technische Universität Braunschweig Studienarbeit. Braunschweig 2005
- [29] Hürlimann, D.: Objektorientierte Modellierung von Infrastrukturelementen und Betriebsvorgängen im Eisenbahnwesen, ETH Zürich Dissertation. Zürich 2001
- [30] Kantamaa, V.-M., Mäenpää, H. u. Pitkänen, J.-P.: Simulation as a planning tool for Helsinki railway station yard layout. SIGNAL + DRAHT 107 (2013) 10, S. 55–60
- [31] OpenTrack Railway Technology - Eisenbahnsimulation, 2015. http://www.opentrack.ch/opentrack/opentrack_d/opentrack_d.html, abgerufen am: 13.01.2016
- [32] LUKS – Analysis of lines and junctions. <http://www.via-con.de/development/luks>, abgerufen am: 13.01.2016
- [33] railML.org. Die XML-Schnittstelle für Eisenbahnanwendungen. <http://railml.org>, abgerufen am: 30.10.2015
- [34] Wenzel, B., Wolf, A. u. Uminski, V.: Eine durchgehende Werkzeugkette für Messung und Planung von ETCS. Umsetzung am Beispiel von ProSig und

- SAT.engine im Kontext ETCS. EI - Der Eisenbahningenieur 66 (2015) 9, S. 70-73
- [35] Klaus, C.: Vom Bleistift zur Maus: LST-Planungswerkzeuge heute und morgen. Fachtagung der TU Dresden gibt einen Überblick zu Möglichkeiten der Planungsunterstützung und aktuellen Entwicklungen. EI - Der Eisenbahningenieur 66 (2015) 7, S. 40-46
- [36] Jacoby, H.: Einführung einer Geodateninfrastruktur bei der DB Netz AG (DB-GDI). Motivation, fachliche Eigenschaften und Umsetzung. EI - Der Eisenbahningenieur 63 (2012) 1, S. 19-22
- [37] Demitz, J. u. Parádi, F.: Höhere Betriebssicherheit und Zuverlässigkeit durch verhaltensorientierte Ausbildung. Eisenbahntechnische Rundschau (ETR) 58 (2009) 6, S. 316-322
- [38] Dietsch, S., Grippenkov, J. u. Naumann, A.: FaBKon - Neue Bedienkonzepte für Fahrdienstleiter. Dieser Beitrag stellt den vom DLR entwickelten Fahrdienstleiter-Bedienplatz-Konfigurator vor, mit dem Bedienoberflächen konfiguriert und erprobt werden können. EI - Der Eisenbahningenieur 66 (2015) 5, S. 78-81
- [39] Milius, B., Lindner, T. u. Burkhardt, M.: Usability-Studien im Virtuellen Eisenbahnbetriebslabor des IfEV. Was Usability ist und wie sie im universitären Kontext analysiert werden kann. EI - Der Eisenbahningenieur 66 (2015) 6, S. 31-35
- [40] Hrivnák, I. u. Hundt, R.: Das Anwendungsspektrum der Stellwerkssimulation – eine Übersicht. Die Betriebs- und Stellwerkssimulation BEST erfüllt vielfältige Aufgaben in der Bahnsystemtechnik. EI - Der Eisenbahningenieur 66 (2015) 3, S. 44-47
- [41] Buder, J. u. Oelschläger, S.: Veränderter ESTW-Planungsprozess mit „PlanPro“ (Teil 1). EI - Der Eisenbahningenieur 65 (2014) 11, S. 48-51
- [42] Buder, J. u. Oelschläger, S.: Veränderter ESTW-Planungsprozess mit „PlanPro“ (Teil 2). EI - Der Eisenbahningenieur 65 (2014) 12, S. 36-39
- [43] Brödel, R., Klaus, C. u. Buder, J.: Neue Werkzeuge in der LST-Planung mit PlanPro. EI - Der Eisenbahningenieur 66 (2015) 07, S. 51-54
- [44] Elsweiler, B. u. Steinebach, P.: Entwicklung und Umsetzung von Konformitätstests in der Leit- und Sicherungstechnik. SIGNAL + DRAHT 108 (2014) 6, S. 10-16
- [45] Asbach, L., Hungar, H., Lemmer, K. u. Meyer zu Hörste, M.: Formalisierung von Tests für hochautomatisierte Testausführung. SIGNAL + DRAHT 108 (2014) 9, S. 26-34

- [46] National Instruments Germany GmbH: TestStand. Die Industriestandard-Testmanagementsoftware. <http://www.ni.com/teststand/d/>, abgerufen am: 07.07.2016
- [47] Asbach, L., Grosse-Holz, J. u. Johne, M.: Automatisierte Konformitätstests für ETCS-Bordrechner. Durch Testautomatisierung können Labortests schneller, mit höherer Qualität durchgeführt und besser in den Entwicklungsprozess der Hersteller integriert werden. EI - Der Eisenbahningenieur 61 (2013) 10, S. 72–75
- [48] SIMPACK GmbH: Multi-Body Simulation. SIMPACK MBS Software, Gilching. <http://www.simpack.com>, abgerufen am: 16.01.2016
- [49] Liebig, S., Quarz, V. u. Dronka, S.: Simulation von Schienenfahrzeugen mit MKS-Software. Simulation im Maschinenbau. Dresden, Jahr um 2004
- [50] Kalker, J. J.: A Fast Algorithm for the Simplified Theory of Rolling Contact. Vehicle System Dynamics 20 (1982) 1, S. 1–13
- [51] Viereck, U.: Dynamisches Kraftschlussmodell zur Optimierung von Gleitschutzsystemen. Fortschrittberichte VDI / 12, Nr. 678. Düsseldorf: VDI-Verlag 2008
- [52] Kossmann, C.: Fahrtechnische Auslegung und Zulassung zweiachsiger Lokomotiven für Geschwindigkeiten bis 120 km/h. 12. Internationale Schienenfahrzeugtagung Dresden. Dresden 2012
- [53] Hermanns, M.: Mechatronische Spurführungsregelung mit Rückfallebene und Sicherheit gegen Entgleisen für Schienenfahrzeuge. Fortschrittberichte VDI : Reihe 12, Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik, Bd. 778. Düsseldorf: VDI-Verlag 2014
- [54] Abdelfattah, B.: Entwicklung eines Losradfahrwerkskonzeptes für Schienenfahrzeuge, RWTH Aachen Dissertation. Aachen 2014
- [55] Adamski, D.: Simulation in der Fahrwerktechnik. Einführung in die Erstellung von Komponenten- und Gesamtfahrzeugmodellen. ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg 2014
- [56] Knirsch, S. u. Mandt, D.: Entwicklung von Antriebskomponenten mittels 1D-Systemsimulation. Im vorliegenden Beitrag wird der hohe Stellenwert einer ganzheitlichen Simulation im Entwicklungsprozess bei Voith Turbo dargestellt. Eisenbahntechnische Rundschau (ETR) 59 (2010) 11, S. 767–773
- [57] Haupt, C.: Ein multiphysikalisches Simulationsmodell zur Bewertung von Antriebs- und Wärmemanagementkonzepten im Kraftfahrzeug, Technische Universität München Dissertation. München 2012

- [58] Dronka, S.: Die Simulation gekoppelter Mehrkörper- und Hydraulik-Modelle mit Erweiterung für Echtzeitsimulation, Technische Universität Dresden Dissertation. Dresden 2004
- [59] Zhang, W., Shen, Z. u. Zeng, J.: Study on dynamics of coupled systems in high-speed trains. *Vehicle System Dynamics* 51 (2013) 7, S. 966–1016
- [60] Metzger, U. u. Klos, H.: Der Train Control Simulator (TCSim) der DB Systemtechnik. *EI - Der Eisenbahningenieur* 61 (2010) 8, S. 44–48
- [61] Demitz, J.: Fahrdienstleiterausbildung - vom Simulator zum web-basierten Training. *SIGNAL + DRAHT* 108 (2014) 9, S. 43–49
- [62] Wolter, S. u. Dobrosi, A.: ETCS-Funktionalität für die Fahrdienstleiter-Ausbildungsanlage der DB AG. *SIGNAL + DRAHT* 109 (2015) 1+2, S. 28–32
- [63] Dobrosi, A., Hrivnák, I. u. Szilva, P. E.: Stellwerkssimulation für die Ausbildung - Erfahrungen und Herausforderungen. *SIGNAL + DRAHT* 107 (2013) 12, 6-9
- [64] National Marine Electronics Association - NMEA. <http://www.nmea.org>, abgerufen am: 03.11.2015
- [65] SBF Reference Guide. Version 1.9.0, Septentrio Satellite Navigation, Leuven, Belgium 2010
- [66] Tröster-Schmid, C.: GPS, Glonass, Galileo Receiver Testing Using a GNSS Signal Simulator. Application Note. Products: R&S SMBV100A 1GP86_1E, München 2012. http://www.insidegnss.com/special/elib/RS_GNSS_Receiver_Testing.pdf, abgerufen am: 01.11.2016
- [67] Tröster-Schmid, C.: Hardware in the Loop (HIL) Testing with a GNSS Simulator. Application Note. Products: R&S SMBV100A 1GP102_1E, München 2015. https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1gp102/1GP102_1E_HIL_Testing_with_GNSS_Simulator.pdf, abgerufen am: 01.11.2016
- [68] Marais, J., Meurie, C., Flancquart, A., Lithgow, S. u. Barbu, G.: Innovative simulations of GNSS performances in a realistic railway environment. CERGAL. Dresden 2014
- [69] Wang, J., Tao, W., Grasso Toro, F., Baocai, R., Lu, D. u. Liu, J.: GNSS-Based Train Trajectory Simulation System. 2016 Joint Rail Conference. April 12-15, 2016, Columbia, South Carolina, USA. New York, N.Y.: American Society of Mechanical Engineers 2016
- [70] Rahmig, C., Johannes, L. u. Lüddecke, K.: Detecting Track Events with a Laser Scanner for using within a Modified Multi-Hypothesis Based Map-Matching Algorithm for Train Positioning. European Navigation Conference (ENC). Wien 2013

- [71] Mandelka, G.: GNSS-based Telematics Applications. European Satellite Navigation Cooperation Day. Warschau, Polen 2004
- [72] Winter, J.: Telematik im Einsatz bei der Belgischen Staatsbahn. Eurail-Telematics. Berlin 2008
- [73] Saabel, I.: Innovative Güterwagen – Neue Geschäftsmodelle für Wagenverleiher. VDI-Expertenforum: Automatisierung für Schienenverkehrssysteme – Der Weg zum Güterwagen 4.0. Aachen 2016
- [74] Kauschke, S.: Nutzung bahnbezogener Sensordaten zur Vorhersage von Wartungszyklen, Technische Universität Darmstadt Diplomarbeit. Darmstadt 2014
- [75] European Railway Agency: Technical specifications for interoperability (TSI), Brüssel. <http://www.era.europa.eu/Core-Activities/Interoperability/Pages/TechnicalSpecifications.aspx>, abgerufen am: 14.07.2016
- [76] Jugelt, S.: Telematics Applications for Passengers and freight TAP/TAF TSI. railML conference. Paris 2013
- [77] Geistler, A.: Telematiklösung INTERFLO 50 – Assistenzsystem zur Effizienzsteigerung im Eisenbahnverkehr. GMA Fachausschuss 7.61 - Automatisierung für Schienenverkehrssysteme. Dortmund 2009
- [78] Dürrschmidt, G., Harter, M. u. Beitelschmidt, M.: 5 Jahre Messstraßenbahn Dresden – Erfahrungen und Auswerteprojekte. Eisenbahntechnische Rundschau (ETR) 63 (2014) 6, S. 36–41
- [79] Johannes, L., Almeida, E., Groos, J. C. u. Adam, S.: Georeferenzierte Erfassung von Messdaten mit Schienenfahrzeugen. Ein kostengünstiges Multi-Sensor-System zur gleisgenauen Georeferenzierung wird auf dem Diagnosefahrzeug DFZ der SBB erprobt. EI - Der Eisenbahningenieur 66 (2015) 11, S. 12–17
- [80] Urech, A.: GADEROS - Galileo Demonstrator for Railway Operation System. Project Overview, 2002. https://web.archive.org/web/20060507133816/http://galileo.uic.asso.fr/docs/gaderos_project_overview.pdf, abgerufen am: 21.04.2017
- [81] Rousseau, M., Wilms, F., Besure, S. u. Willekens, J.: LOCOLOC. Final Presentation, Noordwijk 2004, abgerufen am: 31.01.2016
- [82] Entwicklung eines Demonstrators für Ortungsaufgaben mit Sicherheitsverantwortung im Schienengüterverkehr (DemoOrt). Abschlussbericht der Phasen 1 und 2. Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik Nr. 8, Meyer zu Hörste, M., Beisel, D., Becker, U., Böhringer, F., Geistler, A., Gerlach, K., Grimm, M., Gu, X., Gutsche, K., Hasberg, C., Hensel, S., Lemmer, K., Lörchner, C., May, J., Pelz, M., Poliak, J., Ross, R., Schnieder, E., Schröder, J. u. Stiller, C., Braunschweig 2009

- [83] Lu, D. u. Schnieder, E.: Performance Evaluation of GNSS for Train Localization. IEEE Transactions on Intelligent Transport Systems. 2015
- [84] González, E., Prados, C., Antón, V. u. Kennes, B.: GRAIL-2. Enhanced Odometry based on GNSS. Procedia - Social and Behavioral Sciences 48 (2012), S. 880–887
- [85] Barbu, G. u. Marais, J.: The SATLOC project. TRA - Transport Research Arena, France (2014), Paris, Frankreich 2014. <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/98/71/06/PDF/doc00017948.pdf>, abgerufen am: 31.01.2016
- [86] Barbu, G., Hanis, G., Kaiser, F. u. Stadlmann, B.: SATLOC - GNSS gestützte Zugsicherung für Strecken mit niedriger Verkehrsdichte. SIGNAL + DRAHT 108 (2014) 4, S. 39–44
- [87] Raspoli, F., Sensesi, F., Neri, A., Schweizer, A., Wendland, U., Scalise, S. u. Castorina, M.: Satellite localisation and IP-based public telecoms for ERTMS. SIGNAL + DRAHT 108 (2014) 11, S. 52–58
- [88] Raspoli, F.: ERSAT Ertms over Satellite platform. role and expectation from EGNOS & GALILEO. European Space Solutions, Prag, Tschechien 2014. www.european-space-solutions.eu, abgerufen am: 21.04.2017
- [89] Manz, H.: Sicherheitsnachweisführung für die satellitenbasierte Ortung im Schienenverkehr - GaLoROI. GMA Fachausschuss 7.61 - Automatisierung für Schienenverkehrssysteme. Braunschweig 2013
- [90] Lüddecke, K., Rahmig, C. u. Lemmer, K.: Hochgenaue und integrale Ortung für den Schienenverkehr der Zukunft. Die Bereitstellung verlässlicher Ortungsinformationen auf dem Triebfahrzeug ist ein zentrales Thema des Forschungsprojektes PiLoNav. EI - Der Eisenbahningenieur 63 (2012) 9, S. 72–75
- [91] Rütters, R. M.: Autonome Positionsbestimmung von Schienenfahrzeugen unter Verwendung differentieller GNSS-Verfahren, Universität RWTH Aachen Dissertation. Aachen 2014
- [92] Wikipedia: KLUB-U - Wikipedia, the free encyclopedia, 2015. <https://en.wikipedia.org/w/index.php?oldid=697191385>, abgerufen am: 31.01.2016
- [93] Stadlmann, B., Kaiser, F. u. Mairhofer, S.: Rechnergestütztes Zugleitsystem für die Pinzgauer Lokalbahn. SIGNAL + DRAHT 106 (2012) 5, S. 28–33
- [94] Geistler, A.: Bordautonome Ortung von Schienenfahrzeugen mit Wirbelstrom-Sensoren, Universität Karlsruhe Dissertation. Karlsruhe 2007
- [95] Haus, J. u. Lauiniger, N.: Optische Gitter: Die Abbildung der Realität. 75 Jahre berührungslose dynamische Meßtechnik auf der Basis optischer Gitter. www.laser-journal.de (2007) 2, S. 39–43

- [96] Baier, M. u. Rütters, R.: Verfahren zur Positionsbestimmung eines Schienenfahrzeugs. Patent:DE102009042359A1. 24.03.2011
- [97] Grootings, R.-A.: Erfahrung, neue Technologien und Pioniergeist: Die konsequente Weiterentwicklung des Siemens Prüf- und Validationcenters zum Rail Service Center. ZEVrail 137 (2013) 9, S. 340–347
- [98] Pölöskey, M.: GALILEO-Anwendungszentrum für bodengebundenen Verkehr. ZEVrail Glasers Annalen 136 (2012) 4, S. 149–153
- [99] Kipper, R. u. Gerber, U.: Gleislagefehler – Ursachen, Messung und Bewertung. Um die Sicherheit und den Fahrkomfort im Eisenbahnbetrieb zu gewährleisten, müssen Gleislagefehler vermieden bzw. begrenzt werden. Eisenbahntechnische Rundschau (ETR) 62 (2013) 12, S. 40–44
- [100] Roesch, M.: Moderne Gleismessfahrzeuge für den Nachweis der qualitätsgerechten Bauausführung. EI - Der Eisenbahningenieur 98 (2004) 9, S. 48–53
- [101] Hemmrich, C., Schmeister, J., Thies, H.-G. u. Zück, H.: Gleismessfahrzeuge der DB Netz AG: Weiterentwicklung der Mess- und Auswertetechnik. Eisenbahntechnische Rundschau (ETR) 56 (2007) 6, S. 359–363
- [102] Scheer, A. u. Erpenbeck, T.: Der ICE-S als Referenzfahrzeug für die ETCS-Zulassung in Deutschland. SIGNAL + DRAHT 109 (2015) 12, S. 12–14
- [103] Schmidt, W.: Moderne Verfahren zur Messung des Lichtraums. Lichtraummessfahrzeug LIMEZ III. Eisenbahntechnische Rundschau (ETR) 63 (2014) 4, S. 26–31
- [104] Auer, F. u. Peinsipp, C.: Internationaler Trend zu Multifunktions-Messfahrzeugen. ZEVrail 138 (2014) 4, S. 132–139
- [105] fact-sheet Schiene 2014. We inspect: Over 100,000 kilometres of rails each year, EURAILSCOUT, 2014
- [106] Wolter, K. U., Erhard, F., Gabler, H. u. Hempe, T.: Fahrzeugseitige Überwachung der Infrastruktur im Regelbetrieb. Kontinuierlich inspizieren – Instandsetzung gezielt planen – Qualität und Nachhaltigkeit prüfen. Eisenbahntechnische Rundschau (ETR) 63 (2014) 7+8, S. 32–36
- [107] Beitelschmidt, M., Harter, M., Zechel, G. u. Dürrschmidt, G.: Die Dresdner Messstraßenbahn. Ein Erprobungsträger für Messtechnik, Langzeitbeobachtung und Ausbildung. 39. Tagung Moderne Schienenfahrzeuge. Graz, Österreich 2010
- [108] Striegler, G., Sauermann, I., Harter, M. u. Beitelschmidt, M.: Die Dresdner Messstraßenbahn – Konzept, Architektur, Komponenten. Eisenbahntechnische Rundschau (ETR) 58 (2009) 12, S. 716–721
- [109] Lüddecke, K. u. Kluge, A.: Mobiles Labor RailDrive - synchrone Erfassung von Sensordaten. Zeitreferenzierte Multisensoraufzeichnung des fahrzeugnahen

- Umfeldes basierend auf einem modular konzentrierten und flexibel einsetzbaren Zwei-Wege-Fahrzeug. *EI - Der Eisenbahningenieur* 65 (2014) 1, S. 46–49
- [110] Gerlach, K.: POSITRON – ein sicheres Ortungssystem. Workshop „Effiziente Nutzung regionaler Eisenbahninfrastruktur“, Braunschweig 2008. <http://elib.dlr.de/55818>, abgerufen am: 13.02.2016
- [111] Simpack Release 2018. Documentation. Gilching: Dassault Systemes Simulia Corp. 2018
- [112] Schindler, C. (Hrsg.): Handbuch Schienenfahrzeuge. Entwicklung, Produktion, Instandhaltung. Hamburg: Eurailpress 2014
- [113] ANSI X3.4-1986; 26.03.1986. *for Information Systems - Coded Character Sets - 7-Bit American National Standard Code for Information Interchange (7-Bit ASCII)*. <http://www.unicode.org/L2/L2006/06388-review-incits4.pdf>, abgerufen am: 20.06.2016
- [114] Septentrio, 2015. <http://www.septentrio.com>, abgerufen am: 05.11.2015
- [115] Mao, Y.: Positionsbestimmung der IFS-Gleise durch Messbüro. IFS-Bericht ??/2011 (nicht öffentlich), Institut für Schienenfahrzeuge und Fördertechnik (IFS), Technische Universität RWTH Aachen. Aachen 2011
- [116] OpenStreetMap Deutschland: Die freie Wiki-Weltkarte. <http://openstreetmap.de>, abgerufen am: 09.11.2015
- [117] Allotta, B., Pugi, L., Ridolfi, A., Malvezzi, M., Vettori, G. u. Rindi, A.: Evaluation of odometry algorithm performances using a railway vehicle dynamic model. *Vehicle System Dynamics* 50 (2012) 5, S. 699–724
- [118] Niehöfer, B.: Modellbasierte Interferenzkompensation für die satellitengestützte Ortung in urbanen Szenarien. Local Interference Compensation for GNSS, Technische Universität Dortmund Dissertation. Dortmund 2016
- [119] Schütz, A.: Analyse des Verschleißverhaltens konventioneller Drehgestelle im Vergleich mit Einzelradfahrwerken unter Berücksichtigung realer Fahr-szenarien, RWTH Aachen Masterarbeit. Aachen 2014
- [120] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Verkehrssystemtechnik: RailSET: Railway Simulation Environment for Train drivers and operators. Flyer, Braunschweig 2012
- [121] Mairhofer, F.: CargoMover - Das Mobilitätskonzept von Siemens für einen Güterverkehr mit Zukunft. Gesamtverkehrsforum, Bd. 1799. Braunschweig: VDI-Verlag 2003
- [122] CODATA; 30.7.2015. *CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 2014*. <https://arxiv.org/abs/1507.07956>, abgerufen am: 22.05.2016

- [123] Scheres, S. u. Hoffmann, P. L.: Einbindung eines Fahrerpultes in die Steuerung eines schienengebundenen Versuchsfahrzeuges, Technische Universität RWTH Aachen Projektarbeit. Aachen 2015
- [124] Bellof, A.: Verfahren und Gerät zum Bestimmen von Richtung und Geschwindigkeit eines Objektes. Patent:DE 43 13 497 C2. 30.03.2000
- [125] Hasler CORRail 1000 Sensor | HaslerRail. Leaflet. http://www.haslerrail.com/de/hasler_corrail, abgerufen am: 29.10.2015
- [126] Haus, J.: CORREVIT® Längenmeßtechnik auf stochastischen Oberflächen, Wetzlar 2005, abgerufen am: 25.03.2014
- [127] Kistler Correvit S-Motion. Berührungslose Optische Sensoren. Typ CSMO-TA..., Kistler Gruppe, Winterthur, Schweiz 2015. https://www.kistler.com/de/de/anwendungen/automotive-research-test/fahrdynamik-betriebsfestigkeit/fahrzeugdynamik/produkte/#correvit__s__motion_2_achsige_optische__sensoren__c_s_m_o_t_a, abgerufen am: 15.07.2016
- [128] 3DM-GX3-25 Single Byte Data Communications Protocol. DCP Manual 8500-0015 Revision 015, MicroStrain, Inc., 459 Hurricane Lane, Williston, VT 05495, USA 2012
- [129] Proxitron, Datenblatt Induktive Analog-Sensoren, Warengruppe 260, Proxitron GmbH, Elmshorn, Elmshorn 2003
- [130] UIC Merkblatt 505-1; Mai 2006. *Eisenbahnfahrzeuge, Fahrzeugbegrenzungslinien*. <http://www.shop-etf.com/en/eisenbahnfahrzeuge-fahrzeugbegrenzungslinien.html>, abgerufen am: 15.07.2016
- [131] DIN EN 15273-1:2014-06. *Bahnanwendungen - Begrenzungslinien - Teil 1: Allgemeines - Gemeinsame Vorschriften für Infrastruktur und Fahrzeuge, Teil 2: Fahrzeugbegrenzungslinien, Teil 3: Lichtraumprofile*. <http://www.beuth.de/en/standard/din-en-15273-1/186059039>, abgerufen am: 20.04.2017
- [132] Galileo above Kundenhandbuch, Astrium GmbH, Aachen 2014
- [133] Kampeter, S.: SIMPACK-Modell CargoMover, Institut für Schienenfahrzeuge und Fördertechnik (IFS) der Technischen Universität RWTH Aachen. Aachen 2010
- [134] Fahrzeugbeschreibung CargoMover (Interner Bericht), Institut für Schienenfahrzeuge und Fördertechnik (IFS) der Technischen Universität RWTH Aachen, Aachen 2009
- [135] Windhoff CargoSprinter Konstruktionszeichnung. STE Triebdrehgestell. Zeichnungsnummer 5.460.518 079-0d, Windhoff AG, Rheine, Rheine 1996
- [136] Konstruktionsunterlagen CargoSprinter. Baugruppentelleliste. Kom.-Nr. Nr. 260135, Windhoff AG, Rheine, Rheine 1996

- [137] Nicolin, J.: Über den Einfluß von torsionselastischen Radsatzwellen auf das Laufverhalten eines Schienenfahrzeugs, Technische Universität RWTH Aachen Dissertation. Aachen 1983
- [138] ISO 668:2013-08; 2013. *Series 1 freight containers - Classification, dimensions and ratings*. <https://www.iso.org>, abgerufen am: 21.04.2017
- [139] railML Schema Version 2.0 (CC-BY-NC-ND-3.0). Dresden: railML.org 2018
- [140] Revisiting Spacetrack Report #3: Rev 2. AIAA 2006-6753. AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference, Keystone, CO (2006)
- [141] IERS Technical Note 36. *IERS Conventions*. <http://www.iers.org/iers/EN/Publications/TechnicalNotes/tn36.html>, abgerufen am: 21.04.2017

- [142] – [150] ungenutzt

9.1.2 Veröffentlichungen des Autors

In diesem Abschnitt werden die Veröffentlichungen aufgelistet, bei denen der Autor ein Hauptautor oder Mitautor ist. Die Publikationen als Hauptautor sind Vorveröffentlichungen dieser Arbeit und werden im Text nicht als Quellen verwendet.

- [151] **Lüdicke, D.**; Eßer, F.; Dellmann, T.
Die IFS-Simulationsumgebung – Simulation von Schienenfahrzeug-Versuchsfahrten mit ETCS und Satellitennavigation; POSNAV 2014: Positionierung und Navigation für Intelligente Transportsysteme, 20.–21. November 2014 / Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation e.V. (DGON) 90-103 (2014)

- [152] Eßer, F.; **Lüdicke, D.**; Dellmann, T.
Der IFS-Erprobungsträger 1 – Vollbahn-Versuchsfahrzeug der RWTH Aachen für automatisches Fahren und Lokalisierung im Schienenverkehr; POSNAV 2014: Positionierung und Navigation für Intelligente Transportsysteme, 20.–21. November 2014 / Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation e.V. (DGON) 82-89 (2014)

- [153] **Lüdicke, D.**; Eßer, F.; Dellmann, T.
IFS-Simulationsumgebung – Simulation von Schienenfahrzeug-Versuchsfahrten mit ETCS und Satellitennavigation; 15. GMA Fachausschuss 7.61 Automatisierung für Schienenverkehrssysteme, 18.–19. September 2014, Wegberg-Wildenrath

- [154] **Lüdicke, D.**; Eßer, F.; Marchand, T.; Dellmann, T.
Modular Multi-Domain Co-Simulation for Rail Vehicle Testing with ETCS Scenario Control; Summer Simulation Multi-Conference (SCSC) 6.–10. Juli 2014, Monterey, CA, USA (Reviewed paper, ACM referiert)
- [155] Rütters, R.; Breuer, M.; **Lüdicke, D.**
SiPoS-Rail – Differentielles GNSS-Verfahren mit ortsfesten Elementen; GMA Fachausschuss 7.61 Automatisierung für Schienenverkehrssysteme, Braunschweig, 14. Juni 2013
- [156] Rütters, R.; Breuer, M.; Zhang, J.; Abel, D.; **Lüdicke, D.**
Comparison of State Estimation Filters for Safety Relevant Localization in Rail Applications, Based on the Milestone Based SiPoS-Rail Approach; Proceedings of the 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2012), Nashville, USA, September 17–21, 2012 1530-1536 (2012) (ISI referiert)
- [157] **Lüdicke, D.**; Dellmann, T.; Rütters, R.
Sichere Positionierung eines Schienenfahrzeuges für automatische Rangierbewegungen; Tagungsband / 12. Internationale Schienenfahrzeugtagung: 12.–14. September 2012; mit begleitender Fachausstellung; Dresden, Rad, Schiene 2012 / [Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, Fakultät Maschinenbau, Verfahrenstechnik] (2012)
- [158] Rütters, R.; **Lüdicke, D.**; Schäfer, B.; Abel, D.
Sichere Positionsinformationen für Schienenfahrzeuge mittels GNSS-Daten und ortsfesten Elementen; POSNAV 2011: Positionierung und Navigation für Intelligente Transportsysteme, 22.–23. November 2011 / Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation e.V. (DGON) (2011)
- [159] Schäfer, B.; Rütters, R.; **Lüdicke, D.**; Abel, D.
GNSS für das System Bahn am Beispiel der satellitenbasierten Zielbremsung; Wo?-Kongress 2010, 16.–17. Juni 2010, Duisburg (2010)
- [160] **Lüdicke, D.**; Abdelfattah, B.; Daniel, A. F.; Dellmann, T.
Unterstützung von Rangierprozessen durch Galileo-Satellitennavigation; Workshop Satellitennavigation: Silicon Saxony Day 2010, 19. Mai 2010, Dresden (2010)
- [161] **Lüdicke, D.**; Daniel, A. F.; Abdelfattah, B.
Neue Möglichkeiten bei Rangierprozessen durch Galileo-Satellitennavigation; Cost reduction in rail freight transport: 4. EurailTelematics Konferenz, 23.–24. März 2010, Berlin (2010)

9.1.3 Verwendete studentische Arbeiten

Der Autor hat im Rahmen seiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Schienenfahrzeuge und Fördertechnik (IFS) der Technischen Universität RWTH Aachen folgende studentische Arbeiten betreut. Zur Anerkennung der Leistungen der Studenten und deren Unterstützung bei der wissenschaftlichen Arbeit des Autors werden in diesem Abschnitt die studentischen Arbeiten dokumentiert. Die studentischen Arbeiten werden in dieser Arbeit frei verwendet und sind im Text nicht als eigenständige Quellen aufgeführt.

Abschlussarbeiten

- [162] Gegner, Kerstin; Bachelorarbeit 2014
Modellierung von Gleisplänen für eine Schienenverkehrssimulation
- [163] Dering, Andreas; Diplomarbeit 2014
Berechnung von Positionsdaten eines Schienenfahrzeug-Erprobungsträgers
- [164] Dollmann, Günter; Diplomarbeit 2014
Auswertung von Inertialsensor (IMU) Messdaten eines Schienenfahrzeuges
- [165] Schäfer, Raphael; Bachelorarbeit 2013
Entwicklung realistischer Ausfallszenarien für Sensoren an einem Schienenfahrzeug in MATLAB/Simulink auf Basis einer FMEA (Fehler-, Möglichkeits- und Einflussanalyse)
- [166] Schütz, Andreas; Bachelorarbeit 2013
Analyse und Dokumentation der pneumatischen Ausrüstung des IFS-Erprobungsträger 1
- [167] Cabanes, Jorge Jordá; Bachelorarbeit 2013
Untersuchung einer Sensoranordnung zur Messung des Drehgestell-Ausdrehwinkels an einem Schienenfahrzeug
- [168] Eßer, Florian; Diplomarbeit 2012
Entwicklung und Einbindung einer ETCS-Funktionalität in eine Simulationsumgebung
- [169] Marchand, Tobias; Diplomarbeit 2012
Erstellung einer Simulationsumgebung für ein Schienenfahrzeug mit GNSS-Simulation
- [170] Süßmilch, Pascal; Diplomarbeit 2012
Entwicklung und Konstruktion eines Sensorschutzgehäuses und Fahrzeugadapters am Fahrwerk eines Schienenfahrzeugs

Studienleistungen

- [171] Pannen, David u. Krämer, Martin; Projektarbeit 2014
Entwicklung neuer Auswerteverfahren für eine Schienenfahrzeugsensorik
- [172] Aydt, Jonathan u. Schneck, Marcel-Alexander; Projektarbeit 2014
Robuste Erkennung und Lokalisierung von elektronischen Wegmarken mit einem Schienenverkehr-Versuchsfahrzeug
- [173] Galindo, Ximena Ayala u. Jagodzinski, Nils; Projektarbeit 2013
Positionsbestimmung mit RFID am Schienenfahrzeug
- [174] Schuler, Andreas; Studienarbeit 2013
Messtechnik und Messdatenauswertung an Schienenfahrzeugen
- [175] Reinke, Fabian Patrick; Studienarbeit 2013
Analyse der technischen Dokumentation eines EBAS-Bremssystems für ein Schienenfahrzeug
- [176] Rüttschilling, Fabian; Studienarbeit, 2012
Entwicklung und Konstruktion von Wegsensorik am Fahrwerk eines Schienenfahrzeuges
- [177] Niewöhner, Sascha; Studienarbeit 2012
Programmierung serieller Schnittstellen zur Verarbeitung von Satelliten-Navigationsdaten
- [178] Schäfer, Tristan; Studienarbeit 2012
Methodische Analyse und Entwicklung neuer Systeme im Schienengüterverkehr
- [179] Eßer, Florian; Studienarbeit 2011
Entwicklung und Umsetzung eines Konzepts zur Dokumentation der elektrischen Komponenten an einem Schienenfahrzeug-Versuchsträger
- [180] Dirkmann, Markus; Studienarbeit 2011
Entwicklung einer CAD Gesamtkonstruktion des IFS-Erprobungsträgers 1
- [181] Bolduan, André; Studienarbeit 2011
Analyse einer Steuergeräte-Software für ein Schienenfahrzeug

9.1.4 Beteiligung an Veröffentlichungen ohne Autorenschaft

In diesem Abschnitt werden die Veröffentlichungen aufgelistet, an denen der Autor inhaltlich beteiligt war, woraus jedoch keine Autorenschaft entstand.

[182] WDR Lokalzeit: Der intelligente Zug
Westdeutscher Rundfunk (WDR), 25.06.2014

9.2 Symbolverzeichnisse

Die in dieser Arbeit verwendeten Abkürzungen und Symbole werden in diesem Kapitel zusammengefasst und kurz beschrieben. Zur eindeutigen Zuordnung der Abkürzungen und zur Vermeidung von allgemeinen Internetadressen im Literaturverzeichnis wird hier zusätzlich die Webadresse (URL) zu den Internetauftritten von Institutionen angegeben.

Abschnitt 9.2.1 führt alle verwendeten Abkürzungen auf. Die Abkürzungen und Namen von Projekten stehen separat in Abschnitt 9.2.2. Die Systematik der Variablenbezeichnung (Nomenklatur) definiert Abschnitt 9.2.3. Daran anschließend werden in Abschnitt 9.2.4 die Variablen mit lateinischen Variablenbuchstaben und in Abschnitt 9.2.5 die Variablen mit griechischen Variablenbuchstaben aufgeführt. Der Abschnitt 9.2.6 fasst die verwendeten Konstanten zusammen. Die systematisch verwendeten Indizes sind in Abschnitt 9.2.7 dokumentiert.

9.2.1 Abkürzungen und Eigennamen

1D	eindimensional
3D	dreidimensional
ADIF	Administrador de Infraestructuras Ferroviarias, Spanische Eisenbahn-Infrastrukturgesellschaft URL: http://www.adif.es
AFB	Automatische Fahr- und Bremssteuerung
ANSYS	ANSYS Germany GmbH, Hersteller von Simulationssoftware URL: http://www.ansys.com/de-DE
ATC	Automatic Train Control, Zugbeeinflussungssystem Automatic
ATO	Train Operation, automatisierter Fahrbetrieb
ATP	Automatic Train Protection, Zugsicherungssystem

ARIC	Automotive & Rail Innovation Center Aachen URL: http://www.aric-aachen.de
ASCII	American National Standard Code for Information Interchange (7-Bit) [113]
Astrium	Astrium GmbH, ab 2013: Airbus Defence and Space GmbH URL: http://www.astrium.eads.net
ATC	Aldenhoven Testing Center of RWTH Aachen University GmbH URL: http://www.atc.rwth-aachen.de
automotiveGATE	Galileo-Satellitennavigation-Testumgebung auf dem ATC, Galileo GATE für Straßenfahrzeuge URL: http://www.aic-aachen.org/de/automotivegate
aviationGATE	Galileo-Satellitennavigation-Testumgebung für den Luftverkehr
BA	Bachelorarbeit, Abschlussarbeit im Bachelor-Studiengang
Baumer	Baumer Holding AG, 8501 Frauenfeld, Schweiz, Sensorhersteller URL: http://www.baumer.com
BE	Balisenempfänger (ETCS)
BEST	Betriebs- und Stellwerkssimulator, Simulationssoftware URL: http://transys.hu
BIU	Balise Interface Unit, Schnittstelle innerhalb der ETCS-Fahrzeugausrüstung
BOA	Verordnung über den Bau und Betrieb von Anschlussbahnen
Bombardier	Bombardier Transportation, Hersteller von Schienenfahrzeugen URL: http://de.bombardier.com/de/transportation.html
BTM	Balise Transmission Module (zu ETCS)
C/A	Coarse/Acquisition (GPS-Code des L1-Band)
CAN	Controller Area Network (Feldbus)
CargoSprinter	Container-Triebzug, DB-Baureihe 690/691 URL: http://www.windhoff.com/d/v1/csp
CBTC	Communication Based Train Control, allg. Bezeichnung für Zugleit- und Sicherungssystem für Nicht-Vollbahnen
CEDEX	Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas URL: http://www.cedex.es
CDMA	Code Division Multiple Access, Codemultiplexverfahren

CINEBENCH Testsoftware für Computer

URL: <https://www.maxon.net/en/products/cinebench>

CM Versuchsfahrzeug CargoMover (gleichnamiges Forschungsprojekt)

CM-ZUB CargoMover Zugbeeinflussung, Steuergerät zur Leit- und Sicherungstechnik von Schienenfahrzeugen (Siemens ZUB262 Steuergerät)

cRIO National Instruments CompactRIO, Rapid Control Prototyping Steuergeräte

URL: <http://www.ni.com/compactrio>

DA Diplomarbeit, Abschlussarbeit im Diplom-Studiengang

DB Deutsche Bahn AG

URL: <http://www.deutschebahn.com>

Deuta DEUTA-WERKE GmbH, Bergisch Gladbach

URL: <http://www.deuta.de>

DHHN92 Deutsches Haupthöhennetz, aktuell gültige Höhensystem in Deutschland

DIN Deutsches Institut für Normung e.V., DIN-Norm

URL: <http://www.din.de>, <https://www.beuth.de>

DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) in der Helmholtz-Gemeinschaft (HGF)

URL: <http://www.dlr.de>

DMI Driver Machine Interface, ETCS Baseline 3

dSPACE dSPACE GmbH, Paderborn, Hersteller von Rapid-Control-Prototyping Steuergeräten und Software

URL: <http://www.dspace.de>

Duagon duagon AG, Dietikon, Schweiz, Steuergerätehersteller

URL: <https://www.duagon.com>

EB Emergency Brake, Notbremsung

EBAS Elektronisches Brems- und Anzeigesystem

EBuLa Elektronischer Buchfahrplan und Langsamfahrstellen

EC Europäische Kommission

EGNOS European Geostationary Navigation Overlay Service

URL: http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/EGNOS

EN Europäische Norm

EPT	Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ der Technischen Universität RWTH Aachen, IFS, gleich EPT1, Referenzfahrzeug
ERA	European Railway Agency URL: http://www.era.europa.eu
ERSA	European Rail Software Applications URL: http://www.ersa-france.com
ERTMS	European Rail Traffic Management System URL: http://www.ertms.net
ESA	European Space Agency, Europäische Weltraumbehörde URL: http://www.esa.int
ESTW	Elektronisches Stellwerk
ETB	Ethernet train backbone (zu TCN)
ETCS	European Train Control System (zu ERTMS)
ETRS	European Terrestrial Reference Frame
Eurobalise	ETCS-Eurobalise, Transparentdatenbalise oder Festdatenbalise, elektronische Wegmarke des ETCS-Systems
Euroloop	Leckleiter im Gleis zur Übertragung des Signalbegriffs im Vorsignalabstand, ETCS Level 1
EURORADIO	Standardisierte Verschlüsselung der GSM-R Datenübertragung, ETCS Level 2
EVC	European Vital Computer (zu ERTMS)
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
FEM	Finite-Elemente-Methode
FFFIS	Form Fit Function Interface Specification
FIS	Functional Interface Specification
FMEA	Fehlermöglichkeits- und –einflussanalyse (engl.: Failure Mode and Effects Analysis)
FMI	Functional Mock-up Interface, standardisierte Schnittstelle zur Kopplung von Simulationssoftware URL: http://fmi-standard.org
FPS	Fahrerpult-Schnittstelle, auf dem Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“
FR1/FR2	Fahrtrichtung 1 / Fahrtrichtung 2
FRS	Functional Requirements Specification

FS	Full Supervision (Betriebsmodus des ETCS)
FTA	Failure Tree Analysis, Fehlerbaumanalyse
Galileo	Europäisches Satellitennavigationssystem
GATE	Galileo Test and Development Environment
GGA	NMEA-Datensatz: „Global Positioning System Fix Data“
GK	Gauß-Krüger Koordinatensystem
GLL	NMEA-Datensatz: „Geographic Position - Latitude/Longitude“
GLONASS	Russisches Satellitennavigationssystem, (Russisch: ГЛОНАСС, Глобальная навигационная спутниковая система)
GNSS	Global Navigation Satellite System, Satellitennavigationssystem
GNSS_3	GNSS-Referenzempfänger Nr. 3 auf dem IFS-Erprobungsträger (Leica)
GNSS_4	GNSS-Rohdatenempfänger auf dem IFS-Erprobungsträger (Septentrio)
GNSS_5	railGATE-GNSS-Empfänger auf dem IFS-Erprobungsträger (Astrium)
GNSS_FR1	GNSS-Einfrequenzempfänger an der Spitze des IFS-Erprobungsträgers in Fahrtrichtung FR1 (ublox)
GNSS_FR2	GNSS-Einfrequenzempfänger an der Spitze des IFS-Erprobungsträgers in Fahrtrichtung FR2 (ublox)
GPS	Global Positioning System, Amerikanisches Satellitennavigationssystem, auch NAVSTAR-GPS)
GSM-R	Global System for Mobile Communications - Rail(way)
GSSF	ESA Galileo System Simulation Facility URL: https://www.gssf.info
H3 SZS	Datenprotokoll im Stellwerksbereich
HiL	Hardware-in-the-Loop
ICE	Intercity-Express, Zuggattung der Deutschen Bahn
ICE-R	AG Intercity-Express, „R“ für Referenzfahrzeug
ICE-S	Intercity-Express, „S“ für Schnellfahrt
ICE-V	Intercity-Express, „V“ für Versuch, ICEexperimental
ID	Identifikator, Bezeichner, eine Kennung
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers URL: http://www.ieee.org

IFS	Institut für Schienenfahrzeuge und Fördertechnik der Universität RWTH Aachen Ab 2016: Institut für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme (ifs) URL: http://www.ifs.rwth-aachen.de
IFS-Erprobungsträger	Versuchsfahrzeug des Institutes für Schienenfahrzeuge und Fördertechnik (IFS) der Universität RWTH Aachen, siehe Anhang A gleich: Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ gleich: Referenzfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“
IMU	Inertial Measurement Unit (3-Achs-Beschleunigungs- und -Winkelgeschwindigkeitssensor, optional mit Magnetometer für Kompassrichtung)
Intermec	Intermec Technologies GmbH, Hersteller von RFID-Hardware URL: http://www.intermec.com
IRT	Institut für Regelungstechnik der Universität RWTH Aachen URL: http://www.irt.rwth-aachen.de
ISO	Internationale Organisation für Normung URL: https://www.iso.org
ITRS	International Terrestrial Reference System
JRU	Juridical Recording Unit, Unfalldatenspeicher (zu ETCS)
KE	Knorr Einheitsventil (Teil der pneumatischen Bremsanlage)
KMC	Key Management Center (zu ETCS)
KS-DG1/2	Drehgestell-Koordinatensystem der Drehgestelle in Fahrtrichtung FR1/FR2
KS-PCW	Lokales Koordinatensystem, gültig im PCW
KS-PCW2	NED-Koordinatensystem des PCWs, gleicher Koordinatenursprung wie KS-PCW
KS-WK	Wagenkasten-Koordinatensystem
KS-WT	Wiegenträger-Koordinatensystem
Leica	Leica Geosystems AG, Schweiz, Hersteller von geodätischen Instrumenten URL: http://www.leica-geosystems.de
LEU	Lineside Electronic Unit
LLA	Longitude Latitude Altitude / Latitude Longitude Altitude
LRBG	Last Relevant Balise Group, Bezug zur ETCS-Eurobalisengruppe

LST	Leit- und Sicherungstechnik
LTM	EUROLOOP Transmission Module (zu ETCS)
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
LZB	Linienzugbeeinflussung, auch Linienförmige Zugbeeinflussung
MATLAB	Numerische matrizenorientierte Berechnungssoftware, The MathWorks Inc., USA URL: http://de.mathworks.com/products/matlab
MA	Movement Authority (ETCS-Nachricht)
MBS	Multibody simulation, Mehrkörpersimulation
MEO	Medium Earth Orbit, Satellitenorbit in einer Höhe zwischen 1.000 km und 30.000 km
MicroStrain	MicroStrain Inc., Sensorhersteller URL: http://www.microstrain.com
MKS	Mehrkörpersystem, Mehrkörpersimulation, gleich MBS
MMI	Man Machine Interface, ETCS Baseline 2, gleich DMI in ETCS Baseline 3
MRP	Mannesmann Rexroth Pneumatik
MS	Microsoft Corporation, USA, Softwarehersteller des Windows-Betriebssystems URL: http://www.microsoft.com
MVB	Multifunction Vehicle Bus (zu TCN)
NAP	Normaal Amsterdams Peil, Pegel Amsterdam
NASA	National Aeronautics and Space Administration (zivile US-Bundesbehörde für Raumfahrt und Flugwissenschaft) URL: http://www.nasa.gov
NATO	North Atlantic Treaty Organization
NAVSTAR-GPS	Navigational Satellite Timing and Ranging – Global Positioning System
NED	Lokales Koordinatensystem, Nord-East-Down – X-Y-Z
NHN	Normalhöhennull-Fläche
NI	National Instruments Germany GmbH, Hersteller von Mess- und Steuerungssoftware, Messelektronik und Rapid-Control-Prototyping-Hardware URL: http://www.ni.com/de-de.html
NID	Bezeichner, siehe ID

NMEA	National Marine Electronics Association URL: http://www.nmea.org
NN	Normal-Null, amtliche Bezugshöhe, seit 1993 durch NHN abgelöst
NORAD	North American Aerospace Defense Command, militärische Einrichtung der USA und Kanadas zur Überwachung des Weltraumes
NTC	National Train Control, ETCS Baseline 3, gleich STM
OBU	On-Board Unit, ETCS-Fahrzeugsteuergerät
OCF	Operation Control Point, Betriebsstelle im railML-Format
ODO	Odometrie, engl: Odometry
OpenStreetMap	Freies Projekt für Geodaten, OpenStreetMap Foundation URL: http://www.openstreetmap.org
OSM	OpenStreetMap, auch Abk. für OpenStreetMap-Dateiformat
PA	Projektarbeit, Studienleistung im Bachelor-Studiengang
PCW	Siemens Prüf- und Validationcenter in Wegberg-Wildenrath
PICAS	Peekel PICAS/Signalog 6000 Measuring Amplifiers, Messverstärker URL: http://www.peekel.com/measuring-amplifier-picas-signalog-6000.html
PRN	pseudorandom noise number, GPS-Satellitennummer
ProfiNet	ethernetbasierter Feldbus URL: https://www.profibus.com
PSL	Pseudolit Nummer im railGATE
PTC	Positive Train Control, funkbasiertes Zugsicherungssystem in den USA
Python	Programmiersprache URL: https://www.python.org
PZB90	Punktförmige Zugbeeinflussung, auch Indusi
Radio Infill	siehe Euroloop
RAF Wildenrath	ehemaliger NATO-Flugplatz der Royal Air Force
Germany RailDrIVE	Rail Driving Validation Environment Versuchsfahrzeug des DLR-Institutes für Verkehrssystemtechnik in Braunschweig
RailDriver	RailDriver Desktop Train Cab Controller URL: http://raildriver.com

railGATE	Galileo-Testzentrum für den schienengebundenen Verkehr URL: http://www.railgate.de
railML	Datenaustauschformat im Schienenverkehrssektor auf XML-Basis URL: https://www.railml.org
RailSET	Railway Simulation Environment for Train Drivers and Operators, [120], am DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik in Braunschweig
RBC	Radio Block Centre, ETCS-Streckenzentrale, Teil der ERTMS-Architektur
RCP	Rapid Control Prototyping
RFID	Radio-Frequency Identification
RFID-Tag	RFID-Transponder
Rohde&Schwarz	ROHDE & SCHWARZ GmbH & Co. KG, Hersteller von Messtechnik URL: https://www.rohde-schwarz.com
RIG	Radimpulsgeber, auch Wegimpulsgeber
RIU	Radio Infill Unit (zu ETCS)
RINEX	Receiver Independent Exchange Format (für GNSS-Rohdaten) URL: http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/data/format/rinex303.pdf
RMC	NMEA-Datensatz: „Recommended Minimum Sentence“
rps	revolutions per second, Umdrehungen pro Sekunde
RS	Radsatz
RS1L	EPT1-Radsatz RS1, Position am Radsatzlager auf der linken Seite
RS1R	EPT1-Radsatz RS1, Position am Radsatzlager auf der rechten Seite
RSSI	Received Signal Strength Indication, Indikator für die Empfangsfeldstärke kabelloser Kommunikationsanwendungen
RWTH	Universität Rheinisch Westfälisch Technische Hochschule Aachen URL: http://www.rwth-aachen.de
S+D	Zeitschrift „Signal + Draht“; URL: http://www.eurailpress.de/verlag/zeitschriften/signal-draht/profil.html
SA	Studienarbeit, Studienleistung im Diplom-Studiengang
SAHARA	Datenprotokoll im Stellwerksbereich
SAPOS	Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung URL: http://www.sapos.de

SB	Betriebsbremse, engl: service brake
SeaGATE	Galileo-Satellitennavigation-Testumgebung für den Schiffsverkehr
Septentrio	Septentrio Satellite Navigation, Hersteller von GNSS-Empfängern URL: http://www.septentrio.com
SBF	Septentrio Binary Format, Dateiformat [65]
SI	Internationales Einheitensystem, frz: Système international d'unités
Sibas	Siemens-Bahn-Automatisierungs-System
Sibas KLIP	Sibas Klemme mit intelligenter Peripherie, gleich SKS
Siemens	Siemens AG URL: https://www.siemens.com
SiL	Software-in-the-Loop
SIL	Safety Integrity Level, Sicherheits- und Integritätsniveau, nach IEC 61508
SKS	Sibas-KLIP-Station
SIMAT	SIMPACK-MATLAB Co-Simulationsschnittstelle, Teil des SIMPACK-Programmpakets
SIMPACK	Mehrkörpersimulationsprogramm, SIMPACK GmbH, Gilching, Deutschland URL: http://www.simpack.com
SimU	Simulationsumgebung
Simulink	Grafische Programmieroberfläche des MATLAB-Simulationsprogramms
SNCB	fr: Société Nationale des Chemins de fer Belges, nl: Nationale Maatschappij der Belgische Spoorwegen (NMBS), de: Nationale Gesellschaft der Belgischen Eisenbahnen (NGBE) URL: http://www.belgianrail.be
SNCF	Société Nationale des Chemins de fer Français, französische Staatsbahn URL: http://www.sncf.com
SOK	Schienenoberkante
Spirent	Spirent Communications plc, Hersteller von GNSS-Simulatoren URL: https://www.spirent.com
SQLite	relationales Datenbanksystem URL: http://sqlite.org
SRS	System Requirements Specification

STM	Specific Transmission Module, ETCS Baseline 2, gleich NTC
SUBSET	Einzelspezifikationen des ERTMS/ETCS
SzS	Szenariosteuerung
T1	Teststring 1 im PCW
T2	Teststring 2 im PCW
TCN	Train Communication Network, nach DIN EN 61375 [13]
TEN	Trans-European Networks, Transeuropäische Netze
Tf	Triebfahrzeugführer (Fahrer)
TIU	Train Interface Unit, zu ETCS
TLE	Two Line Element, Datenformat für Bahnelemente
TOW	Time of Week, Teil des WGS84-Zeitformats
TSI	Technical specifications for interoperability URL: http://www.era.europa.eu/Core-Activities/Interoperability/Pages/TechnicalSpecifications.aspx
TAF TSI	Technical specification for interoperability relating to the telematics applications for freight subsystem of the rail system in the European Union; URL: http://www.era.europa.eu/Document-Register/Pages/TAF-TSI.aspx
TAP TSI	Technical specification for interoperability relating to the subsystem ‘telematics applications for passenger services’ of the trans-European rail system; URL: http://www.era.europa.eu/Document-Register/Pages/TAP-TSI.aspx
TWK	TWK-ELEKTRONIK GmbH, Düsseldorf, Messtechnikhersteller URL: http://www.twk.de
u-blox	u-blox AG, Schweiz, Hersteller von GNSS-Sensoren URL: http://www.u-blox.com
UIC	International Union of Railways URL: http://www.uic.org
UNIFE	Union des Industries Ferroviaires Européennes, Verband der europäischen Eisenbahn-Industrie URL: http://www.unife.org
UNISIG	Union Industry of Signaling (ist eine Arbeitsgruppe der UNIFE) Uniform
URL	Resource Locator, Webadresse

USB	Universal Serial Bus URL: http://www.usb.org
UTC	Universal Time, Coordinated, de: koordinierte Weltzeit
UTM	Universal-Transverse-Mercator-Koordinatensystem
Windhoff	Windhoff Bahn- und Anlagentechnik GmbH, Rheine URL: http://www.windhoff.de
WGS84	World Geodetic System 1984
WIG	Wegimpulsgeber, gleich RIG
WK	Wagenkasten eines Schienenfahrzeuges
WM	Wegmarke
WN/Wn	Week Number, Teil des WGS84-Zeitformats
WT	Wiegenträger eines Schienenfahrzeuges
WTB	Wire Train Bus (zu TCN)
XML	Extensible Markup Language
ZSG	Zentralsteuergerät (auf einem Schienenfahrzeug)
ZUB262	Siemens Steuergerät für Zugsicherungen (ETCS-Fahrzeugsteuergerät)
Zweiweg	Zweiweg International GmbH & Co. KG, Hersteller von Zweiwege-fahrzeugen URL: http://www.zweiweg.de

9.2.2 Projektnamen

3InSat	Train Integrated Safety Satellite System Demonstrator
APOLO	Advanced Position Locator
ATLAS	Advanced Train Location and Administration System
CargoMover	CargoMover, [121]
DemoOrt	DemoOrt
EIRENE	European Integrated Railway Radio Enhanced Network
ERSAT	ERTMS over Satellite platform
GADEROS	Galileo Demonstrator for Railway Operation System

Galileo-above	Anwendungszentrum für bodengebundenen Verkehr Galileo-basierte Assistenzsysteme für Straßen- und Schienenverkehr Aachener Testzentrum für bodengebundenen Verkehr (Schiene und Straße) GALILEO-basierte Assistenzsysteme für Straßen- und Schienenverkehr URL: http://www.galileoabove.de
GaLoROI	Galileo Localisation for Railway Operation Innovation URL: http://www.galoroi.eu
GRAIL	GNSS Introduction in the Rail Sector
GRAIL-2	GRAIL-Nachfolgeprojekt
INESS	Integrated European Signaling System
INTEGRAIL	Integrity improvement for Rail
Locoloc	Locoloc
LOCOPROL	Low Cost satellite based train location system for signalling and train Protection for Low density traffic railway lines
MORANE	Mobile Radio for Railways Networks in Europe
NeuPro	NeuPro
openETCS	Open Proofs Methodology for the European Train Control Onboard System URL: http://openetcs.org , URL: https://itea3.org/project/openetcs.html
PiLoNav	Precise and Integer Localisation and Navigation in Rail and Inland Water Traffic
POSITRON	Positioning for safe Train Operation and Navigation
RCAS	Railway Collision Avoidance System
RUNE	Railway User Navigation Equipment
SATLOC	Satellite based operation and management of local low traffic lines
SiPoS-Rail	Genauigkeitserhöhung und Integritätsprüfung von sicherheitsrelevanten Positionsinformationen mit Satellitennavigation für Anwendungen im Bahnsektor

9.2.3 Nomenklatur

In diesem Abschnitt wird die Systematik beschrieben, nach der in dieser Arbeit die Variablen bezeichnet werden.

Zur Bezeichnung eindimensionaler Größen dienen die in Abschnitt 9.2.4 und 9.2.5 definierten Buchstaben. Durch den unteren Index wird die Größe, je nach Verwendung, näher spezifiziert.

Dreidimensionale Positionen erhalten einen oberen Index des Koordinatensystems auf das sich die Koordinaten beziehen. Der untere Index bezeichnet die Position:

$$p_{i2}^{i1}$$

Abgeleitete dreidimensionale Größen wie Geschwindigkeiten \vec{v} , Beschleunigungen \vec{a} und Drehraten $\vec{\omega}$ erhalten drei Indizes:

$$\vec{v}_{i2,i3}^{i1}$$

Der obere Index $i1$ gibt an, auf welches Koordinatensystem sich die Koordinaten des Vektors beziehen. Die unteren Indizes geben an, dass der Vektor eine Bewegung des $i3$ -Koordinatensystems bezüglich des $i2$ -Koordinatensystems angibt.

Matrizen werden mit einem fett gedruckten Großbuchstaben z.B. **A** bezeichnet.

Richtungskosinusmatrizen werden mit einem großen, fett gedruckten Buchstaben **C** und einem oberen und unteren Index bezeichnet:

$$\mathbf{C}_{i1}^{i2}$$

Die Richtungskosinusmatrix beschreibt die Richtungsänderung d.h. Koordinatentransformation vom $i1$ -Koordinatensystem in das $i2$ -Koordinatensystem.

Variablen mit einer Tilde \sim sind Messwerte.

Variablen mit einem Dach $\hat{}$ sind Näherungswerte oder statistische Schätzwerte.

Beispiele und weitere Rechenregeln sind in [23] S. 34ff angegeben.

9.2.4 Lateinische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Beschreibung
A	m	Apoapsis
\mathbf{A}		Designmatrix in der Ausgleichsrechnung
\sqrt{A}	\sqrt{m}	Wurzel der Länge der kleinen Achse der Ellipse
B	rad	Geografische Breite eines Ellipsoidkoordinatensystems
B		Brennpunkt
C_{ic}	rad	Amplitude der Kosinuskorrektur der Inklination
C_{is}	rad	Amplitude der Sinuskorrektur der Inklination
C_{rc}	m	Amplitude der Kosinuskorrektur des Orbitradius
C_{rs}	m	Amplitude der Sinuskorrektur des Orbitradius
C_{uc}	rad	Amplitude der Kosinuskorrektur des Breitengrades
C_{us}	rad	Amplitude der Sinus-Korrektur des Breitengrades
D		Ausrichtung nach unten, engl: down, Z-Achse
E		Himmelsrichtung Ost, engl: east
E_k		Exzentrische Anomalie
F	N	Kraft
H_N	m	Normalhöhe
$IDOT$	$semi-circle / s$	Änderungsrate des Inklinationswinkels
I_{sys}		SIMPACK-Basiskoordinatensystem
L	rad	Geografische Länge eines Ellipsoidkoordinatensystems
L		Beobachtungen der Ausgleichsrechnung (Vektor)
M	Nm	Moment
M		Ellipsenmittelpunkt
M_0	rad	Mittlere Anomalie zur Referenzzeit t_{oc}
M_k	rad	Mittlere Anomalie (Mittlere Anomalie M)
N		Himmelsrichtung Nord
O		Himmelsrichtung Ost
P		Periapsis

P	s	Umlaufzeit
$P^{t_{sv}(i)}$	$(m, m, m)^T$	Positionsvektor des i -ten Satelliten im ECEF-Koordinatensystem zum Sendezeitpunkt
R		Pseudoabstand (Pseudorange)
$R_i(p_1^e, p_2^e)$	m	geometrische Abstand zwischen zwei Punkten, wahrer Abstand
R_{Rad}	m	effektiver Rollradius der Räder des Radsatzes
S		Himmelsrichtung Süd
T	s	Umlaufzeit für eine Umrundung der Erde
U_{Rad}	m	abrollender Radumfang
W		Himmelsrichtung West
X		Parametervektor in der Ausgleichsrechnung
X_k	m	X-Position in der Orbitalebene
Y_k	m	Y-Position in der Orbitalebene
\hat{Y}_k		Ergebnisvektor der Ausgleichsrechnung
a	m/s	Beschleunigung
a_{brems}	m/s	Beschleunigung, Verzögerung beim Bremsvorgang
a_{f0}	s	GNSS-Satellitenuhrabweichung, Offset in Sekunden
a_{f1}	s/s	GNSS-Satellitenuhrabweichung, lineare Driftabweichung
a_{f2}	s/s^2	GNSS-Satellitenuhrabweichung, quadratische Driftabweichung
d_{ziel}	m	Distanz zu einem Zielpunkt
d_{ziel}	m	Entfernung bis zur Geschwindigkeitsänderung
$ds_{MLR,min}$	m	Encoder-Distanzauflösung
e		numerische Exzentrizität
f_{RIG}	Hz	zeit- und wertekontinuierliche Zahnflanken-Pulsfrequenz des Radimpulsgebers
$f_{RIG \text{ diskret}}$	Hz	zeitdiskrete und wertekontinuierliche Zahnflanken-Pulsfrequenz des Radimpulsgebers
$f_{RIG \text{ diskret verzöge}}$	Hz	gemitteltes Frequenzsignal zwischen zwei Zahnflanken des Radimpulsgebers
$f_{RIG \text{ rausch}}$	Hz	Verrauschte zeit- und wertekontinuierliche Zahnflanken-Pulsfrequenz des Radimpulsgebers
$f_{RIG \text{ diskret rausch}}$	Hz	Verrauschte zeitdiskrete und wertekontinuierliche Zahnflanken-Pulsfrequenz $f_{RIG \text{ rausch}}$

f_{RIG} diskret verzöge	Hz	Verrauschte zeit- und wertediskrete Zahnflanken-Pulsfrequenz, gemittelt zwischen zwei Zahnflanken
h	Stunde	Stunde
h_{ell}	m	ellipsoidische Höhe eines Punktes P_i auf der Erdoberfläche
i	rad	Inklination
i_0	rad	Inklinationswinkel zur Referenzzeit t_{oe}
δi_k	rad	Inklinationskorrektur
i_k	rad	Inklination korrigiert
km	km	Strecken-Kilometrierung
l		Verkürzte Beobachtung in Ausgleichsrechnung
n_{KS}		Anzahl der radial angeordneten (Zahnrad-) Zähne auf der Kodierscheibe für einen Radimpulsgeber
n_{ges}		Anzahl der steigenden Zahnflanken
n_{RIG}		zeit- und wertekontinuierliche Zahnanzahl
n_{RIG} rausch		verrauschte Zahnanzahlsignal
n	rad/s	mittlere Bewegung, Satellitenbahnparameter
Δn	rad/s	Abweichung der mittleren Bewegung n
p		Position
p_r^e	$(m, m, m)^T$	GNSS-Empfängerposition
p_{Ref}^e	$(m, m, m)^T$	ECEF-Position des Fußpunktes eines NED-KS
$p_{sv(i)}^e$	$(m, m, m)^T$	GNSS-Satellitenposition (des i -ten Satelliten)
p_{sv}^e	$(m, m, m)^T$	ECEF-Position des Satelliten zum Empfangszeitpunkt
p^i	$(m, m, m)^T$	ECEF-Position des i -ten Satelliten
δr_k	m	Orbitradius-Korrektur
r_k	m	Orbitradius korrigiert
s	m	Distanz
$s_{allg,sv(i)}$	m	verallgemeinerte Distanzabweichung des i -ten Satelliten
s_{balE}	m	Position der ETCS-Balisenantenne (BA) auf der Gleisachse
$s_{balE,WK}$	m	Abstand zwischen der Drehkranzposition und der Balisenempfängerposition in X-Richtung (Fahrzeuglängsrichtung) im Wagenkasten-

		Koordinatensystem (KS-WK)
s_{brems}	m	Zurückgelegter Bremsweg während der Verzögerungszeit t_{brems}
s_{ges}	m	Gesamtbremsweg
s_{hWM1}, s_{hWM2}	m	Distanz der Hilfswegmarken zur Hauptwegmarke auf der Gleisachse
s_{odo}	m	Gemessene Distanz der Fahrzeugspitze zu einem Referenzpunkt (aus ETCS SUBSET-041, Abschnitt 5.3.1.1)
$s_{r,err\ max}$	m	Distanzabweichung der maximale Uhrenabweichung $t_{r,err\ max}$
$s_{Tr,DG1}$	m	Distanz des Fahrzeug-Referenzpunktes auf der Gleisachse
$s_{\Delta t_{sv,i}}$	m	Längenmessabweichung der Uhrenabweichung Δt_{sv} des i-ten Satelliten
Δs_{RotE}	m	Erdrotationsabweichung
$ds_r, \Delta s_R$	m	Distanz der Empfängeruhrenabweichung dt_r
s_x	m	Schlupf in Längsrichtung, Längsschlupf
t	s	Zeit
t	s	Epoche (bei GNSS-Zusammenhang)
t_1^2	rad	Richtungswinkel
t_{brems}	s	Gesamtzeit für die Bremsung
t_{dec}	s	Vergangene Zeit seit Beginn der Bremsung
t_e	s	Empfangszeitpunkt
t_{f0}	s	Parameter der Satellitenuhrzeitkorrektur
t_{f1}	s	Parameter der Satellitenuhrzeitkorrektur
t_{f2}	s	Parameter der Satellitenuhrzeitkorrektur
t_k	s	Beginn der Referenzepoche
t_{oc}	s	Referenzzeit der Satellitenuhr in Ephemeriden
t_{oe}	s	Referenzzeit der Ephemeriden
t_{sim}	s	Simulationszeit
t_{sv}	s	Systemzeit des Satelliten zum Botschaftsanfang (innerhalb der GPS-Woche)
$t_{r,err\ max}$	s	maximale GNSS-Empfängeruhr Zeitabweichung
dt_r	s	GNSS-Empfängeruhr Zeitabweichung
$\Delta t_{sv(i)}$	s	Uhrzeitabweichung des Satelliten, satellitenabhängige Signallaufzeitabweichung
Δt_r	s	empfängerseitige Laufzeitabweichung

Δt_{rel}	<i>s</i>	Zeitkorrektur der relativistischen Einflüsse
Δt_{Puls}	<i>s</i>	zeit- und wertekontinuierliche Pulsperioden- dauer
u_k	<i>rad</i>	Breitengrad korrigiert
u_{Rad}	<i>m/s</i>	Radumfangsgeschwindigkeit
$u_{RadSchlupf}$	<i>m/s</i>	schlupfbehaftete Radumfangsgeschwindigkeit
δu_k	<i>rad</i>	Breitengrad-Korrektur
v	<i>m/s</i>	Geschwindigkeit
v_{Fzg}	<i>m/s</i>	Relativgeschwindigkeit zwischen Schienen- fahrzeug und Gleisachse
v_k	<i>m/s</i>	Wahre Anomalie
v_{max}	<i>m/s</i>	aktuelle Maximalgeschwindigkeit
v_{min}	<i>m/s</i>	Minimalgeschwindigkeit
v_{soll}	<i>m/s</i>	Sollgeschwindigkeit der Bremskurve
v_{sollBC}	<i>m/s</i>	distanzabhängige Sollgeschwindigkeit der Bremskurve
v_{ziel}	<i>m/s</i>	zukünftige Maximalgeschwindigkeit
Δv	<i>m/s</i>	Geschwindigkeitsunterschied zwischen der aktuellen Maximalgeschwindigkeit v_{max} und der zukünftigen Maximalgeschwindigkeit v_{ziel}
w_x	<i>m/s</i>	Längsgleitgeschwindigkeit
x	<i>m</i>	Koordinate der X-Achse
y	<i>m</i>	Koordinate der Y-Achse
z	<i>m</i>	Koordinate der Z-Achse

9.2.5 Griechische Buchstaben und Symbole

Zeichen	Einheit	Beschreibung
θ	<i>rad</i>	Inklination Fahrweg
ϕ	<i>rad</i>	Rollwinkel Fahrweg
ψ	<i>rad</i>	Azimut Fahrweg
Ω	<i>semi- circle</i>	Winkel des aufsteigenden Knotens (Rektaszension des Knotens)
$\dot{\Omega}$	<i>semi- circle / s</i>	Änderungsrate der Rektaszension
Ω_0	<i>rad</i>	Längengrad des aufsteigenden Knotens zur Referenzzeit t_{oe}

Ω_k	<i>rad</i>	Korrigierter Längengrad des aufsteigenden Knotens \oslash
\oslash		Aufsteigender Knoten
\oslash		Absteigender Knoten
Υ		Frühlingspunkt
λ	<i>rad</i>	Geografische Länge eines Kugelkoordinatensystems
λ_{Ref}^e	<i>rad</i>	Längengrad eines Kugelkoordinatensystems für den Fußpunkt eines NED-Koordinatensystems
$\tilde{\rho}(p_r, p_{sv}^i)$	<i>m</i>	Pseudoabstandssignal
φ	<i>rad</i>	Geografische Breite eines Kugelkoordinatensystems
φ_e	<i>rad</i>	Rotationswinkel der Erde während der Signallaufzeit vom GNSS-Satellit zum Empfänger
φ_{ges}	<i>rad</i>	Gesamtwinkel
φ_k	<i>rad</i>	Breitengrad
φ_{Rad}	<i>rad</i>	Drehwinkel des Radsatzes bei der letzten nicht vollständigen Radumdrehung
φ_{Ref}^e	<i>rad</i>	Breitengrad eines Kugelkoordinatensystems für den Fußpunkt eines NED-Koordinatensystems
φ_u	<i>rad</i>	kontinuierlicher Radsatzgesamtwinkel
ω	<i>semi-circle</i>	Argument des Perigäums / Argument der Periapsis
ω_{ie}^n	<i>rad/s</i>	Erdrotation im Navigationskoordinatensystem KS-NED
ω_{ie}^{IMU}	<i>rad/s</i>	Erdrotation im Sensorkoordinatensystem KS-IMU
ω_{en}^n	<i>rad/s</i>	Transportrate der Erde im Navigationskoordinatensystem KS-NED
ω_{en}^{IMU}	<i>rad/s</i>	Transportrate der Erde im Sensorkoordinatensystem KS-IMU
$\omega_{Radsatz\ ideal}$	<i>rad/s</i>	ideale Radsatz-Rotationsgeschwindigkeit
ω_u	<i>rad/s</i>	kontinuierliche (schlupfbehafte) Radsatz-Rotationsgeschwindigkeit

9.2.6 Konstanten

Zeichen	Wert	Einheit	Beschreibung
F	$-4,442807633 \cdot 10^{-10}$	$\frac{s}{\sqrt{m}}$	Konstante nach Farrell [22]
G_{CODATA}	$6,674\,0831 \cdot 10^{-11}$	$\frac{m^3}{kg \cdot s^2}$	Gravitationskonstante nach CODATA [122]
G	$6,673 \cdot 10^{-11}$	$\frac{m^3}{kg \cdot s^2}$	Gravitationskonstante nach WGS84 [18]
a	6378137,0	m	Große Halbachse des WGS84 Ellipsoid
b	$a \cdot (1 - f)$ 6356752,3142	m	Kleine Halbachse des WGS84 Ellipsoid
c	$2.99792458 \cdot 10^8$	$\frac{m}{s}$	Vakuum-Lichtgeschwindigkeit
f	$\frac{a-b}{a} = \frac{1}{298,257223563}$	-	Abflachung des WGS84 Ellipsoid
f_{L1}	1575.420	MHz	GNSS-Trägerfrequenz L1-Band
f_{L2}	1227.600	MHz	GNSS-Trägerfrequenz L2-Band
g	9,81	m/s^2	Erdbeschleunigung
$km2ms$	$\frac{1}{3,6}$	$\frac{\frac{m}{s}}{\frac{km}{h}}$	Umrechnungsfaktor von Geschwindigkeit $\left[\frac{km}{h}\right]$ in $\left[\frac{m}{s}\right]$
$ms2km$	3,6	$\frac{\frac{km}{h}}{\frac{m}{s}}$	Umrechnungsfaktor von Geschwindigkeit $\left[\frac{m}{s}\right]$ in $\left[\frac{km}{h}\right]$
n_{KS}	80		Zähne auf dem Umfang der Kodierscheibe für einen Radimpulsgeber
S_{Abw}	$\leq 5m + s \cdot 5\%$		Distanzabweichung der gemessenen Distanz nach SUBSET-041 (Abschnitt 5.3.1.1)
$semi - circle$	π	rad	Ein Halbkreis, in der Satelliten-

				navigation genutzte Einheit
THR_{ETCS}	$\leq 2 \cdot 10^{-9}$	$\frac{\text{Fehler}}{h \cdot \text{Zug}}$		maximal tolerierbare Fehlerrate des ETCS-Gesamtsystems nach SUBSET-088 Part 0, Abschnitt 4.1.1.7
$THR_{On-board}$	$\leq 0,67 \cdot 10^{-9}$	$\frac{\text{Fehler}}{h \cdot \text{Zug}}$		maximal tolerierbare Fehlerrate der ETCS-Fahrzeugausrüstung nach SUBSET-088 Part 3, Abschnitt 6.1.1.3
$THR_{Transmission}$	$\leq 0,67 \cdot 10^{-9}$	$\frac{\text{Fehler}}{h \cdot \text{Zug}}$		maximal tolerierbare Fehlerrate der ETCS-Signalübertragung nach SUBSET-088 Part 3, Abschnitt 6.1.1.3
$THR_{Trackside}$	$\leq 0,67 \cdot 10^{-9}$	$\frac{\text{Fehler}}{h \cdot \text{Zug}}$		maximal tolerierbare Fehlerrate der ETCS-Infrastruktur nach SUBSET-088 Part 3, Abschnitt 6.1.1.3
v_{Abw1}	$\pm 2 \text{ km/h}$			Maximal zulässige Messabweichung nach SUBSET-041 (Abschnitt 5.3.1.2) für Geschwindigkeiten unter 30 km/h
v_{Abw2}	$\pm 2 \text{ km/h} \dots \pm 12 \text{ km/h}$			Maximal zulässige Messabweichung nach SUBSET-041 (Abschnitt 5.3.1.2) für Geschwindigkeiten zwischen 30 km/h und 500 km/h , linear ansteigend
$\omega_e, \quad \omega_{ie}^e$	$7,2921151467 \cdot 10^{-5}$	$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$		Rotationsgeschwindigkeit der Erde
μ	$3,98600441 \cdot 10^{14}$	$\frac{\text{m}^3}{\text{s}^2}$		Gravitationskonstante
λ_{L1}	$\frac{c}{f_{L1}} \approx 0,19 \text{ m}$	m		GNSS-Wellenlänge L1-Band
λ_{L2}	$\frac{c}{f_{L2}} \approx 0,244 \text{ m}$	m		GNSS-Wellenlänge L2-Band

9.2.7 Indizes

DG1/DG2	Koordinatensystem des Drehgestells in Fahrtrichtung FR1/FR2
IFS	lokales Koordinatensystem des IFS
Isys	lokales Koordinatensystem im SIMPACK-Mehrkörper-Simulationsprogramm
PCW	lokales Koordinatensystem des PCW
R	Empfänger, engl: receiver
Ref	Referenz-
Sat	Satellit
Sim	Bezug zur aktiven Simulation
WK	Koordinatensystem des Wagenkastens
WT	Koordinatensystem des Wiegenträgers
b	Fahrzeug-Koordinatensystem, KS-WK
ber	berechnet
e	ECEF-Koordinatensystem
gem	gemessen
i	Inertialkoordinatensystem, ECEF-Koordinatenursprung, Richtung an Fixsternen fest
i	Laufvariable der Satelliten
k	Orbitalebene
k	Laufvariable in Iterationsprozessen
kH	Künstlicher-Horizont-Koordinatensystem, NED-Koordinatensystem, auf Kugel als Erdfigur bezogen
local	lokal
n	Navigationskoordinatensystem, NED
sv	Satellitennummer, identisch PRN, engl: space vehicle

9.3 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Funktionale Eisenbahninfrastruktur [1, 2, 3].....	6
Abb. 2:	ETCS-Systemübersicht mit Schnittstellenspezifikation aus SUBSET-026-2 [6]	9
Abb. 3:	Übersicht ETCS Stufe 2 (vereinfacht).....	10
Abb. 4:	ETCS-Fahrzeugausrüstung (nach [3]).....	12
Abb. 5:	ETCS-DMI mit aktivierter Zwangsbremse, mit Touchscreen (links), mit Soft Keys (rechts) ([6] ERTMS-015560 S. 73 Figure 53 – Brake Intervention)	14
Abb. 6:	Richtungs- und Referenzpunktdefinition einer ETCS-Balisengruppe nach SUBSET-027	15
Abb. 7:	Im Gleis verlegte ETCS-Eurobalisen, Transparentdatenbalise (mit Kabelanschluss) und Festdatenbalise (ohne Kabelanschluss), 9.7.2016, Aachen Hbf: Gleis 8E.....	16
Abb. 8:	Aufbau des ETCS-Datenformates	17
Abb. 9:	(links) Radsatzlager mit zwei Radimpulsgebern, (rechts) Encoder am Radsatzlager.....	21
Abb. 10:	Prinzip eines Radimpulsgebers, nach [15]	21
Abb. 11:	Rechtecksignal eines zweikanaligen Radimpulsgebers, nach [15]	22
Abb. 12:	Experimentelle Anordnung von zwei Deuta DRS05 Doppler-Radaren am Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“, Hintergrund: Siemens ETCS-Eurobalisenantenne.....	23
Abb. 13:	Geodätische Bezugsflächen, nach [16].....	24
Abb. 14:	Dreidimensionale kartesische Koordinaten (X,Y,Z), geografische Koordinaten (B,L) und ellipsoidische Höhe (<i>hell</i>) eines Punktes P_i auf der Erdoberfläche [19].....	26
Abb. 15:	Lokales kartesisches Koordinatensystem.....	28
Abb. 16:	Geometrische Beschreibung einer idealen Satellitenbahn als Ellipse [26].....	32
Abb. 17:	Zusammenhang von UTC-Zeit mit 16 Schaltsekunden und GPS-Zeit auf Zeitstrahl.....	34
Abb. 18:	IFS-Institutsgebäude (links) und Werkhalle mit Gleisanschluss (rechts)	47
Abb. 19:	Luftbild des Prüf- und Validationcenters in Wegberg-Wildenrath. Die roten Dreiecke kennzeichnen symbolisch Standorte der acht Pseudoliten des railGATE. (Quelle: ARIC)	49
Abb. 20:	Dresdner Messstraßenbahn [107]	51
Abb. 21:	DLR RailDrIVE [109]	52

Abb. 22:	Simulations- und Systemstruktur der Simulationsumgebung	60
Abb. 23:	Browseransicht des Szenario-Live-Viewers mit einer OpenStreetMap-Karte auf der inneren Abstellgruppe des Prüf- und Validationcenters in Wildenrath	63
Abb. 24:	Streckendefinition durch Aneinanderreihung von geometrischen Grundformen (Primitiven) als verkettete Objekte.....	66
Abb. 25:	Primitiven mit Richtungswinkel im lokalen Koordinatensystem	67
Abb. 26:	Streckendefinition in Vorwärtsdefinition, Rückwärtsdefinition und als Punkt-Punkt-Definition; Anfangspunkte mit Richtungspfeil; Primitive-Definitionsrichtung durch Pfeil in der Mitte der Primitive	69
Abb. 27:	MATLAB-Script zur Konfiguration der in Abb. 28 dargestellten Primitive	71
Abb. 28:	Streckendefinition als MATLAB-Workspace Struktur	71
Abb. 29:	Szenario-Viewer mit geladener Streckendefinition (PCW 20er-Gleise)	72
Abb. 30:	Simulink-Zentralmodell, oberste Verzeichnisebene	76
Abb. 31:	Signalfluss des RCP-Systems auf dem realen IFS-Erprobungsträger (oben) und der SiL-Architektur in der Simulationsumgebung (unten).....	78
Abb. 32:	Funktionale Schnittstellen der ETCS-Fahrzeugausrüstung	81
Abb. 33:	Detail des Subsystems ETCS_OBU im Simulink-Zentralmodell zur Erzeugung eines „MA_Request“-Botschaft.....	82
Abb. 34:	Detail des in Abb. 33 dargestellten Simulink-Subsystem „Msg_132_MA-Request“ zur Erzeugung der Datenstruktur der „MA-Request“-Botschaft.....	83
Abb. 35:	Simulink-Submodell des ETCS Driver Machine Interface.....	84
Abb. 36:	An das ETCS-DMI gesendete Datenstruktur des ETCS-Fahrzeugsteuergerätes als Simulink-Bus im Subsystem „Man-Machine Interface (Input)“	85
Abb. 37:	Datenstruktur der vom ETCS-DMI an das ETCS-Fahrzeugsteuergerät gesendeten Signale, Subsysteme „Train Data from Workspace“ und „Man-Machine Interface (Output)“	86
Abb. 38:	Signalfluss innerhalb des ETCS-Fahrzeugsteuergerätes, mit Bremskurvenberechnung und Ein-/Ausgabe an das ETCS-DMI.....	88
Abb. 39:	ETCS-Fahrzeugschnittstelle, links Simulink-Bus vom Fahrzeug an das ETCS-OBU ankommend, rechts Simulink-Bus von ETCS-OBU an das Fahrzeug	89
Abb. 40:	Auswertung der Datenstruktur einer ausgelesenen ETCS-Eurobalise.....	90
Abb. 41:	Implementierung des Fahrermodells (Subsystem „Driver“ in Abb. 30).....	92
Abb. 42:	Bremskurve (BC) mit distanzabhängiger Geschwindigkeitsreduzierung	94

Abb. 43:	Bremskurve mit konstanter Beschleunigung.....	95
Abb. 44:	Minimalimplementierung der Zentralsteuergerät-Funktionalität (Subsystem „Central Control Unit“ in Abb. 30)	96
Abb. 45:	Allgemeines Bewegungsmodell	97
Abb. 46:	Strukturen von ein- und dreidimensionalen Bewegungsmodellen.....	98
Abb. 47:	Lineares Bewegungsmodell, kontinuierliche Zeitbasis.....	99
Abb. 48:	Lineares Bewegungsmodell, diskrete Zeitbasis	99
Abb. 49:	Struktur der Positionsberechnung.....	100
Abb. 50:	Schnittstelle zwischen SIMPACK und Simulink mit Koordinatentransformation in ECEF.....	101
Abb. 51:	SIMPACK-Streckendefinition im Basiskoordinatensystem <i>Isys</i> mit Parameterdefinition nach SIMPACK-Dokumentation [111, Figure G.35.1].....	103
Abb. 52:	SIMPACK-Darstellung des 1-Körper-Modells.....	104
Abb. 53:	SIMPACK 3-Körper-Modell, 3D-Ansicht	105
Abb. 54:	SIMPACK 5-Körper-Modell, 3D-Ansicht (links), 2D-Ansicht (rechts)....	106
Abb. 55:	Gesamtfahrzeugmodell des Versuchsfahrzeuges "IFS-Erprobungs- träger 1", SIMPACK 3D-Ansicht.....	107
Abb. 56:	Struktur eines Sensormodells	109
Abb. 57:	Ausschnitt aus einer railML-Datei, Definition von zwei ETCS- Eurobalisen der Balisengruppe 9 als Teil des Streckenelementes „PCW_T1_Gleis_120_Gerade_1“	119
Abb. 58:	Distanz des Balisen-Lesegerätes auf der eindimensionalen Gleiskurve	119
Abb. 59:	Distanzberechnung zwischen Balise und Balisen-Lesegerät	120
Abb. 60:	Implementierung des ETCS-Eurobalisenempfängers	120
Abb. 61:	Markerposition (gelb markierte Koordinatensysteme) der RFID- Antenne im 5-Körper-Modell (Abschnitt 5.8.2.2), SIMPACK 3D- Darstellung, oben: Antennenmarker, unten: Marker auf Schienenoberkante.....	121
Abb. 62:	Ableitung der RFID-Eigenschaften aus dem Abstand zur Wegmarke.....	122
Abb. 63:	SIMPACK Markerpositionen der GNSS-Antennen (gelb markierte Koordinatensysteme) im 5-Körper-Modell	126
Abb. 64:	Ausrichtung von drei IMU-Achsen mit Sensorelementen	128
Abb. 65:	Struktur des Satellitennavigationsmodells, schematischer Ausschnitt aus dem Simulink-Zentralmodell (Abb. 30).....	131
Abb. 66:	Verlauf der Zeitabweichung der Empfängeruhr mit Zeitkorrektur	132
Abb. 67:	Grafische Beschreibung der Satellitenbahn mit Korrekturparametern [25].....	134

Abb. 68:	Grafische Interpretation der Pseudoabstandsberechnung	140
Abb. 69:	Simulink-Subsystem zur Berechnung von Satellitenposition und Satellitengeschwindigkeit im ECEF-Koordinatensystem	142
Abb. 70:	Ausschnitt des Sensor-Fehler-Moduls, Subsysteme der Satellitenavigation	143
Abb. 71:	Simulink-Subsystem zur Berechnung des wahren Abstandes der sichtbaren Satelliten	144
Abb. 72:	Berechnung des satellitenindividuellen Zeitversatzes der Pseudoabstands-Laufzeitmessung, Subsystem „calc_delta_t_sv“ in Abb. 73	144
Abb. 73:	Berechnung des Pseudoabstands mit Fehlermodell	145
Abb. 74:	links: IFS-Gleisanlage im lokalen Koordinatensystem, rechts: IFS-Gleisanlage im WGS84-Koordinatensystem mit Messpunkten.....	146
Abb. 75:	IFS-Gleisanlagen im Szenario-Viewer dargestellt mit OpenStreetMap-Karte	146
Abb. 76:	Streckendefinition des PCW als MATLAB-Plot	147
Abb. 77:	Referenzgeschwindigkeit des IFS-Erprobungsträgers auf der Testfahrt ...	150
Abb. 78:	Streckendefinition mit Wegmarken, Start- und Endpunkt.....	150
Abb. 79:	Szenario-Live-Viewer mit der Streckendefinition für den PCW-Teststring T1 und beschrifteten Streckenelementen (Hintergrund: OpenStreetMap [116]).....	152
Abb. 80:	SIMPACK-Modell in Startsituation.....	153
Abb. 81:	Geometrische Situation an einer Wegmarke.....	154
Abb. 82:	GNSS-3-Positionsabweichung zwischen IFS-Erprobungsträger und Simulations-umgebung, mit Wegmarkenpositionen (WM).....	156
Abb. 83:	Wegmarken-Positionsabweichung im Fahrzeugkoordinatensystem.....	158
Abb. 84:	Szenario-Live-Viewer während der Simulation (Hintergrund: OSM [116])	162
Abb. 85:	MATLAB-Prompt während eines Simulationsdurchlaufes	164
Abb. 86:	Benutzeransicht des Simulink-Zentralmodells während der Simulation ...	165
Abb. 87:	Geschwindigkeitsverlauf (oben), Fahrzeugbeschleunigung (unten).....	167
Abb. 88:	Bremsung auf Null mit Bremskurven, unten: Zustand der Bremskurven-Warnung und Betriebsbremse (ServiceBrake, SB).....	169
Abb. 89:	Aktuelle ETCS-Eurobalisennummer (NID-LRBG, Rot), Distanz seit der Balisenüberfahrt (Blau) und Distanz bis zur nächsten Geschwindigkeitsänderung (Grün)	169
Abb. 90:	Auszug aus der SIMPACK-Streckendefinition, Datei „track.trm“	170

Abb. 91:	MATLAB-Datenstruktur für Streckeninformationen (struct) „TrackInfo“	171
Abb. 92:	Auszug aus der Log-Datei der ETCS-Streckenzentrale; fett: Dateiname:Zeilennummer, unterstrichen: Funktionsname.....	172
Abb. 93:	Radsatz-Umdrehungswinkel und Fahrzeug-Geschwindigkeit bei beschleunigter Bewegung am Startpunkt	176
Abb. 94:	Winkelgeschwindigkeit des idealen und des schlupfbehafteten Radsatzes.....	177
Abb. 95:	Ideale kontinuierliche und zeit- und wertediskrete Pulsfrequenz des Radimpulsgebers.....	178
Abb. 96:	Verrauschte kontinuierliche und diskrete Pulsfrequenz des Radimpulsgebers.....	179
Abb. 97:	Simulink-Technik-Fehlermodell des Radimpulsgebers	180
Abb. 98:	Pulsfrequenz des Radimpulsgebermodells (oben), Fehlerzustände F0..F3 (unten)	180
Abb. 99:	Distanzen der ETCS-Eurobalisen (Blau) und Balisenempfänger (Rot) auf Gleisachse (oben), aktuelle ETCS-Eurobalisen NID (unten).....	181
Abb. 100:	Geometrischer Abstand (3D) zwischen Wegmarkenpositionen und dem RFID-Empfängermarker auf Schienenkopfhöhe (oben), ausgelesene RFID-Tag-IDs der Wegmarken (unten)	183
Abb. 101:	RFID-Signale RSSI und ID an Wegmarke 8.....	184
Abb. 102:	Ideale GNSS-FR1 Antennenposition (WGS84)	185
Abb. 103:	GNSS Technikmodell, zeitliche Auflösung der NMEA-Botschaften eines funktionalen GNSS-Empfängers	186
Abb. 104:	Dreidimensionale Beschleunigungen (oben), Winkelgeschwin- digkeiten (Mitte) und Richtungswinkel (unten) des IMU-Sensors während des Simulationsszenario aus Abschnitt 7.1.1	188
Abb. 105:	Einfluss der Erdbeschleunigung. Erdbeschleunigungsvektor im KS-IMU (oben), Bewegungsbeschleunigung und Erdbeschleunigung im KS-IMU (unten)	190
Abb. 106:	Physikalische Störung der Bewegungs-Winkelgeschwindigkeit durch die Erdrotation	191
Abb. 107:	GPS-Satellitenrichtungen (Kreuze) in sphärischen Koordinaten mit PRN-Nummer der Satelliten, vom Erdmittelpunkt aus betrachtet	193
Abb. 108:	GPS-Satellitenrichtungen (Kreuze) mit Satellitennummer (PRN) auf einem Skyplot an der GNSS-4 Sensorposition.....	194
Abb. 109:	Abweichung zwischen der GNSS-3 Position und der aus den wahren Satellitenabständen berechneten GNSS-4 Position	195

Abb. 110:	Wegabweichung durch Zeitabweichung der Satellitenuhren der sichtbaren Satelliten.....	196
Abb. 111:	Pseudoabstand mit Störungen zwischen GNSS-Empfänger und GNSS-Satelliten.....	198
Abb. 112:	Anzahl sichtbarer Satelliten.....	198
Abb. 113:	Störungen auf alle Pseudoabstandsmessungen.....	199
Abb. 114:	Wahrer Abstand der SimU-GNSS-4 Antenne zu railGATE-Pseudolitenantennen	201
Abb. 115:	Azimet- und Elevationswinkel der GNSS-4 Antenne auf dem Fahrzeug zu den stationären railGATE-Pseudolitenantennen.....	201
Abb. 116:	Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ vor der Versuchshalle des IFS	262
Abb. 117:	Oberste Simulink-Verzeichnisebene des dSPACE-RCP-Systems.....	265
Abb. 118:	Benutzeroberfläche des RCP-Systems mit dSPACE ControlDesk NG ..	266
Abb. 119:	CAD-Konstruktion mit wissenschaftlicher Bewegungssensorik des EPT1	268
Abb. 120:	Mitlaufendes Rad am Drehgestell in Fahrtrichtung FR2	269
Abb. 121:	links: Sensor Hasler CORRail 1000 [125], rechts: Schnittzeichnung [126].....	270
Abb. 122:	Funktionsprinzip CORREVIT-Sensoren [126]	271
Abb. 123:	Einbausituation von RFID-Antenne und RFID-Empfänger an der Innenseite der Frontschürze in Fahrtrichtung FR1	273
Abb. 124:	Induktiver Abstandssensor und Laser-Abstandssensor unter der Antriebswelle in Fahrtrichtung FR2	274
Abb. 125:	Integrierte Wegmarke (Hauptwegmarke).....	276
Abb. 126:	Geodätische Vermessung einer integrierten Wegmarke auf dem Testring T1 im PCW auf der Testfahrt am 24.07.2014.....	276
Abb. 127:	IFS-Erprobungsträger Bürocontainer in Fahrtrichtung FR2	279
Abb. 128:	RailGATE-Benutzersegment (Empfänger) mit Antenne (Quelle: ARIC)	280
Abb. 129:	Darstellung der Koordinatensysteme des Versuchsfahrzeuges „IFS-Erprobungsträger 1“ am CAD-Modell, Seitenansicht (oben), Draufsicht ohne Abdeckplatten (unten).....	284
Abb. 130:	Definition der Messpositionen für KS-WK in Fahrtrichtung FR1	285
Abb. 131:	Geometrische Beschreibung des Wagenkasten-Koordinatensystems KS-WK an der Fahrzeugspitze in Fahrtrichtung FR1	286
Abb. 132:	Definition des Wiegenträger-Koordinatensystems am Drehgestell DG1 links.....	288

Abb. 133:	Definition des KS-DG1 Koordinatensystems, Fahrzeugspitze in Fahrtrichtung FR1, unter dem Frontblech in Fahrtrichtung FR2 fotografiert	289
Abb. 134:	GNSS-FR1 Sensor an der Fahrzeugspitze in Fahrtrichtung FR1	292
Abb. 135:	GNSS-FR2 Sensor an der Fahrzeugspitze in Fahrtrichtung FR2	293
Abb. 136:	Antennen am Bürocontainer in Fahrtrichtung FR1 (in Blickrichtung FR2)	294
Abb. 137:	Einbausituation des IMU-2D Sensors	296
Abb. 138:	RFID-Antenne hinter dem Frontblech in Fahrtrichtung FR1	297
Abb. 139:	Position des vertikalen Abstandslasers	298
Abb. 140:	Position des induktiven Abstandssensors Proxitron	299
Abb. 141:	Definition der Doppler Radare	300
Abb. 142:	Correvit-Sensor	301
Abb. 143:	Lage der vier Drehgestell-Ausdrehwinkel-Messstellen.....	302
Abb. 144:	Drehgestell-Ausdrehwinkelsensorik an der Messstelle DG2R	303
Abb. 145:	Messanordnung Sekundärfederweg.....	304
Abb. 146:	Ausschnitt aus der railML-Datei zur Streckendefinition.....	308
Abb. 147:	SIMPACK-Streckendefinition track.trm im „Measured Track“-Dateiformat	309
Abb. 148:	Ausschnitt aus der railML-Datei, Betriebsstellen (OCPs).....	312
Abb. 149:	Ausschnitt aus der railML-Datei, Fahrplan und Zugparameter	313
Abb. 150:	Broadcast-Ephemeriden der GPS-Satelliten aus Abschnitt 7.3	317
Abb. 151:	Final Orbit Combination der GPS-Satelliten	319
Abb. 152:	Finale Ephemeriden der GPS-Satelliten	320
Abb. 153:	FMEA des Sensor-Fehler-Moduls als MS-Excel-Tabelle.....	333

9.4 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bezeichnung der Winkel für Kugel- und Ellipsoid-Koordinatensysteme	26
Tabelle 2: Szenarioeigenschaften der NMEA-Datensätze	186
Tabelle 3: Komponenten der Pseudoabstandsgenerierung	200
Tabelle 4: Gesamtfahrzeugparameter des Versuchsfahrzeuges „IFS-Erprobungsträger 1“	281
Tabelle 5: Drehgestellparameter des Versuchsfahrzeuges „IFS-Erprobungsträger 1“	281
Tabelle 6: Parameter der Radsätze auf dem Versuchsfahrzeuges „IFS-Erprobungsträger 1“	282
Tabelle 7: Parameter der Primär- und Sekundärfederung auf dem Versuchsfahrzeuges „IFS-Erprobungsträger 1“	283
Tabelle 8: Parameter des Bürocontainers auf dem Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“	283
Tabelle 9: Positionen der Drehgestell-Ausdrehwinkelsensorik	302
Tabelle 10: Fahrplaninformation der Testfahrt aus Abschnitt 6.1	306
Tabelle 11: Operational Control Points auf dem PCW Testring T1	307
Tabelle 12: Eigenschaften der Integrierten Wegmarken auf der Testfahrt am 31.10.2014 auf dem Testring T1 des PCWs	310
Tabelle 13: Positionen der railGATE Pseudolite-Sendeantennen	311
Tabelle 14: GPS-Satelliten-Informationen	320
Tabelle 15: Abweichung der GPS-Satellitenpositionen	322
Tabelle 16: Positionsabweichung von GPS-Satelliten durch die Erdrotation während der Signallaufzeit von Satellit zum Empfänger	323
Tabelle 17: Einfluss der Uhrenabweichung von GPS-Satelliten	325

9.5 Anmerkungen

Die Projekte Galileo-above und SiPoS-Rail wurden in Zusammenarbeit mit dem Institut für Regelungstechnik (IRT) der Universität RWTH Aachen bearbeitet.

Das „Institut für Schienenfahrzeuge und Fördertechnik“ (IFS) der Universität RWTH Aachen wurde zum 01.01.2016 mit dem Wechsel der Institutsleitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Torsten Dellmann zu Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Schindler in „Institut für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme“ (ifs) umbenannt.

Anhang

Der Anhang ist in vier große Abschnitte geteilt.

Der erste Abschnitt A dokumentiert die Eigenschaften des Versuchsfahrzeuges „IFS-Erprobungsträger 1“, das in der Simulationsumgebung als Referenzfahrzeug genutzt wird. Er stellt die Fahrzeugtechnik, die wissenschaftliche Nutzung und die vorhandene Sensorik vor. Die Körperkoordinatensysteme werden definiert und die Sensorpositionen beschrieben. Anhand dieser Definitionen wurden die Sensorpositionen im Mehrkörpersimulationsmodell (Abschnitt 5.8.2.3) festgelegt. Der Abschnitt vervollständigt die methodische Durchgängigkeit und systematische Beschreibungsweise von der praktischen Messtechnik auf dem realen Versuchsfahrzeug bis zu dessen Nachbildung in der Simulationsumgebung.

Der zweite Abschnitt B beschreibt die Konfigurationsparameter der Simulationen in den Ergebniskapiteln Kapitel 6 und Kapitel 7 im Detail. Darin werden weitere technische Details dargestellt, die einen tieferen Einblick in die verwendeten Datenstrukturen geben. Anhand der Parameter wird die Nachvollziehbarkeit und Implementierbarkeit der in den Ergebniskapiteln gezeigten Szenarien hergestellt.

Das dritte Abschnitt C zeigt die ausführlichen Ergebnisse der Satellitennavigationssimulation, die bereits in Abschnitt 7.3 zusammengefasst wurden. Die dargestellten Details geben eine bessere Übersicht über das Simulationsergebnis und einen tieferen Einblick in die Eigenschaften der Satellitennavigationssensorik. In Anhang C.4 wird das hier verwendete Verfahren zur Berechnung der GNSS-Positionslösung aus den wahren Abständen zwischen GNSS-Satelliten und GNSS-Empfänger dargestellt.

Im letzten Abschnitte D des Anhangs werden ergänzende Themen der Simulationsumgebung zusammengefasst, deren vollständige Darstellung im Hauptteil zu sehr abgelenkt hätte. Abschnitt D.1 zeigt die Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA). Abschnitt D.2 dokumentiert die Koordinatentransformationen zwischen den verwendeten Koordinatensystemen.

A Vollbahn-Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“

Ein Schwerpunkt des Institutes für Schienenfahrzeuge und Fördertechnik (IFS) der Universität RWTH Aachen ist die Forschung an Automatisierungslösungen und Assistenzsystemen von Schienenfahrzeugen. Neben Gleisanlagen, Großprüfständen und einer Versuchshalle mit Gleisanschluss besitzt das Institut mehrere (Versuchs-) Schienenfahrzeuge. Das größte und modernste Schienenfahrzeug ist das Vollbahn-Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“.

A.1 Historie und Wissenschaftliche Nutzung

Zur Jahrtausendwende wurde im Projekt CargoMover [121] ein Windhoff-CargoSprinter-Triebzug mit zwei Triebfahrzeugen und drei Mittelwagen erworben. Die beiden Triebfahrzeuge konnten, nach großen Umbauten, als CargoMover-Zwillingsfahrzeuge vollautomatische Fahrbewegungen zwischen zwei Gleisanschlüssen über ein quasi-öffentliches Gleisnetz ausführen. Dafür wurden die Fahrerkabinen entfernt, die Fahrzeugsteuerung ersetzt und umfangreiche Sensorik zur Umfeld- und Situationserkennung eingebaut. Das Zugleitsystem bestand aus einem Siemens ZUB262-Steuergerät auf dem Fahrzeug und einem angepassten Elektronischen Stellwerk (ESTW) im Prüf- und Validationcenter in Wildenrath. In weiteren Forschungs- und Industrieprojekten wurden das Fahrzeug und die Rollenprüfstände des Institutes für die Entwicklung eines innovativen Brems- und Gleitschutzalgorithmus [51] verwendet.



Abb. 116: Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ vor der Versuchshalle des IFS

Im Jahr 2009 ist eines der CargoMover-Fahrzeuge in das Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ (Abb. 116) umbenannt worden. Von 2009 bis 2014 wurde das Fahrzeug in den Projekten Galileo-above und SiPoS-Rail (Abschnitte 3.2.3 und 3.2.4) ausgebaut.

Das Fahrzeug ist nun mit umfangreicher Referenzmesstechnik für Distanz, Geschwindigkeit und Beschleunigung und mit allen konventionellen Odometrie-sensoren ausgerüstet. Es besitzt zusätzlich an den Fahrzeugspitzen Wegmarken-sensoren und mehrere Empfänger für Satellitennavigation. Weitere Fahrzeugzustände wie Relativbewegungen zwischen Fahrzeugbauteilen durch Einfederungen oder der Drehgestell-Ausdrehwinkel werden gemessen. Die Positionen der Fahrzeugteile und Sensoren sind in Anhang A.10 beschrieben.

Der Aufbau der Fahrzeugtechnik und der wissenschaftlichen Mess- und Steuerungstechnik wurde in der Versuchshalle des IFS durchgeführt. Die Inbetriebnahmen, erste Messungen und Validierungen von Algorithmen waren auf den Rangiergleisen des IFS möglich.

Für mehrere Versuchskampagnen wurde das Fahrzeug durch Überführungsfahrten von seinem Heimatbahnhof Aachen-West mit einer Güterzuglokomotive in das Prüf- und Validationcenter in Wildenrath (PCW) gefahren. Während den Überführungsfahrten konnte die Messtechnik eingeschaltet bleiben und Fahrzeug- und Streckendaten aufzeichnen. Die Testfahrten im PCW wurde auf den Rangiergleisen (70er-Gleise) vorbereitet. Für Inbetriebnahmen, die höhere oder länger andauernde Geschwindigkeiten benötigten, war die Nutzung des Teststrings T2 möglich.

Im Rahmen der Inbetriebnahme und Vermessung des railGATES (Abschnitt 3.3.2) sind in mehreren Testfahrten große Teile der Rangieranlagen und die Testgleise des PCWs befahren und vermessen worden.

Innerhalb des Projektes Galileo-above wurden im „Initialprojekt Rail“ ein GNSS-basiertes Rangierer-Assistenzsystem zur Automatisierung von Rangierbewegungen entwickelt. In einer prototypischen Anwendung wurden die GNSS-basierten Funktionen Zielbremsung, Kuppelbereites Positionieren an einem Güterwagen und Rangierassistent (teilautomatisierte Zugbildung durch Umsortierung von Güterwagen auf einer Flachrangieranlage) mit dem Fahrzeug und (echten!) Güterwagen gezeigt.

Die im Projekt SiPoS-Rail entwickelte Lokalisierungseinheit wurde in das dSPACE Rapid-Control-Prototyping Echtzeitsystem (RCP-System) integriert und in Versuchsfahrten auf dem Teststring T1 des Prüf- und Validationcenter in Wildenrath erprobt.

Die in der Simulationsumgebung (Abschnitt 5.4) entwickelte funktionale Implementierung einer ETCS-Fahrzeugausrüstung wurde auf dem RCP-System integriert. Auf einem Notebook wurde die Infrastruktursimulation (Abschnitt 5.3) ausgeführt und mit

dem RCP-System über Ethernet gekoppelt. Die Geschwindigkeitsvorgabe der ETCS-Fahrzeugausrüstung setzt das Fahrzeug über die Fahrzeugsteuerung um.

Zur Auswertung der umfangreichen Mess- und Steuerungstechnik des RCP-Systems, der RCP-Bremssteuergeräte, der dezentralen Messdatenspeicherung und der eingelesenen/ausgegebenen Fahrzeugtechniksignale wurde eine automatisierte Messdatenverarbeitung (Postprocessing) mit einheitlichen Ausgabeformaten in MATLAB entwickelt. Eine Messdatenbank auf Basis von Python ist in der Entwicklung und soll die Weiterverarbeitung der Messsignale, wie in Kapitel 6 und Kapitel 7 gezeigt, erleichtern.

A.2 Das Grundfahrzeug

Der Wagenkasten ist 18,950 m lang (Pufferabstand: 20,190 m) und hat einen Drehgestellabstand von 13,950 m. In der Mitte des Wagenkastens befinden sich zwei Volvo-Penta-Dieselmotoren „RailPack“ mit je 265 kW Leistung. Das Traktionsmoment wirkt über eine mechanische Antriebswelle auf die inneren Radsätze der zwei Drehgestelle. In jedem Drehgestell befindet sich somit ein innerer, angetriebener und ein äußerer, nicht angetriebener Radsatz.

Jedes Drehgestell hat einen eigenen unabhängigen Bremskreis, der über ein Proportionalventil und je ein EBAS-Bremssteuergerät angesteuert wird. In einer NotAus-Situation werden die elektronischen Bremssysteme deaktiviert, und es wird pneumatisch auf das vorhandene KE-Ventil als pneumatische Rückfallebene umgeschaltet.

Das Fahrzeug-Zentralsteuergerät (ZSG) basiert auf einem unterflur verbautem Siemens-Sibas32-Steuergerät und steuert alle grundlegenden Fahrzeugfunktionen.

A.3 Der Leitstand und die Fahrzeugsteuerung im Bürocontainer

Das Fahrzeug kann über zwei Hilfsfahrerstände an den Spitzen des Schienenfahrzeuges von einem Triebfahrzeugführer manuell bedient werden. Auf die Containerverankerungen des CargoSprinter-Wagenkastens wurde bereits im Jahr 2001 ein Bürocontainer aufgesetzt und als Leitstand eingerichtet. Aus dem Leitstand heraus kann der Fahrweg in beide Richtungen eingesehen und über die installierten Fahrzeugschnittstellen aus dem Leitstand heraus bewegt werden.

Im Galileo-above Projekt wurde der Leitstand durch umfangreiche Festeinbauten erweitert. In einen Schaltschrank mit DIN-Schienen ist eine zentrale Spannungsversorgung für alle Verbraucher verbaut. Der 230 V (50 Hz) Zwischenkreis kann aus einem 400 V Netzstrom oder von einem 11 kW Stromgenerator gespeist werden. Aus dem 24 V Bordnetz kann ein 230 VAC Hilfspotenzial erzeugt werden, um bei Ausfall des Generators ein zweites unabhängiges Spannungspotenzial zur Versorgung der Messtechnik bei Versuchsfahrten vorhalten zu können.

Zur Messdatenerfassung und Fahrzeugsteuerung wurde ein dSPACE-Rapid-Control-Prototyping-Echtzeitsystem (RCP-System) installiert. Alle Messsignale werden hier zentral zusammengeführt und von dem RCP-System mit einer Taktrate von 1000 Hz aufgenommen. In Abb. 117 ist die Grundstruktur der Simulink-Programmierung des RCP-Systems dargestellt. Im Block „Hardware Interface“ befinden sich die Hardware-Treiber, in denen die Rohdaten eingelesen werden. Der Input-Block wandelt die Rohdaten in aufbereitete Sensordaten um. Über die Variable MessAppNr kann der Bediener in der grafischen Oberfläche (Abb. 118) die Testprogramme einschalten. Im Output-Block werden die Ausgabeschnittstellen zusammengefasst. Über zwei Fahrzeugschnittstellen kann das RCP-System Fahrbefehle an das Zentralsteuergerät senden und somit die Fahrbewegungen steuern.

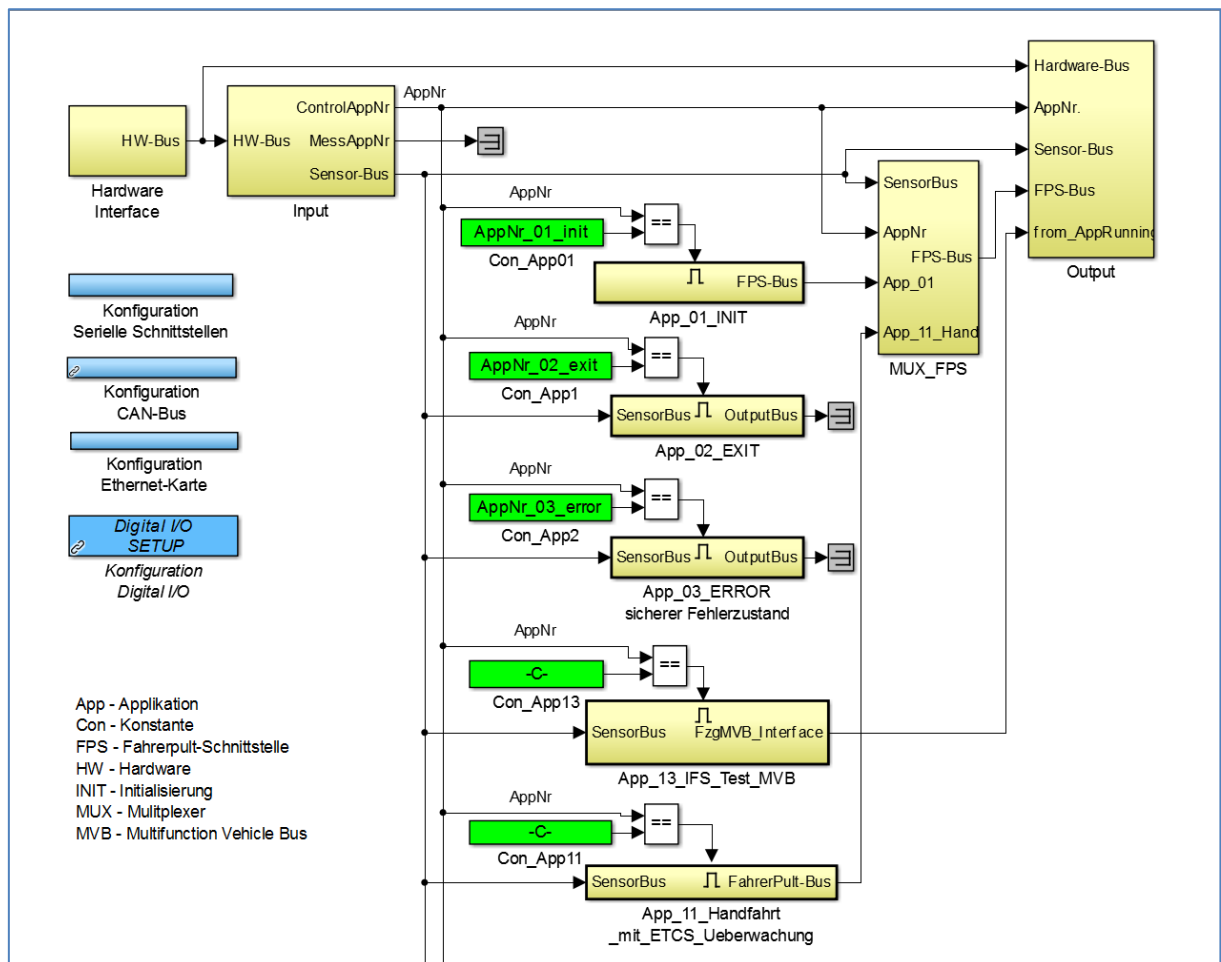


Abb. 117: Oberste Simulink-Verzeichnisebene des dSPACE-RCP-Systems

Zur Fahrzeugsteuerung durch einen Bediener oder den Triebfahrzeugführer wird die grafische Bedienoberfläche (Abb. 118) des RCP-Systems genutzt. Über zwei NotAus-Kreise mit je acht NotAus-Schaltern kann das Fahrzeug jederzeit zum Stillstand (sicherer Zustand) gebracht werden. Über die RCP-Benutzeroberfläche werden die aktuellen Variablenzustände angezeigt und die Benutzereingaben an das RCP-System

gesendet. In der Software können Testprogramme oder automatische Fahrprogramme manuell aktiviert werden.

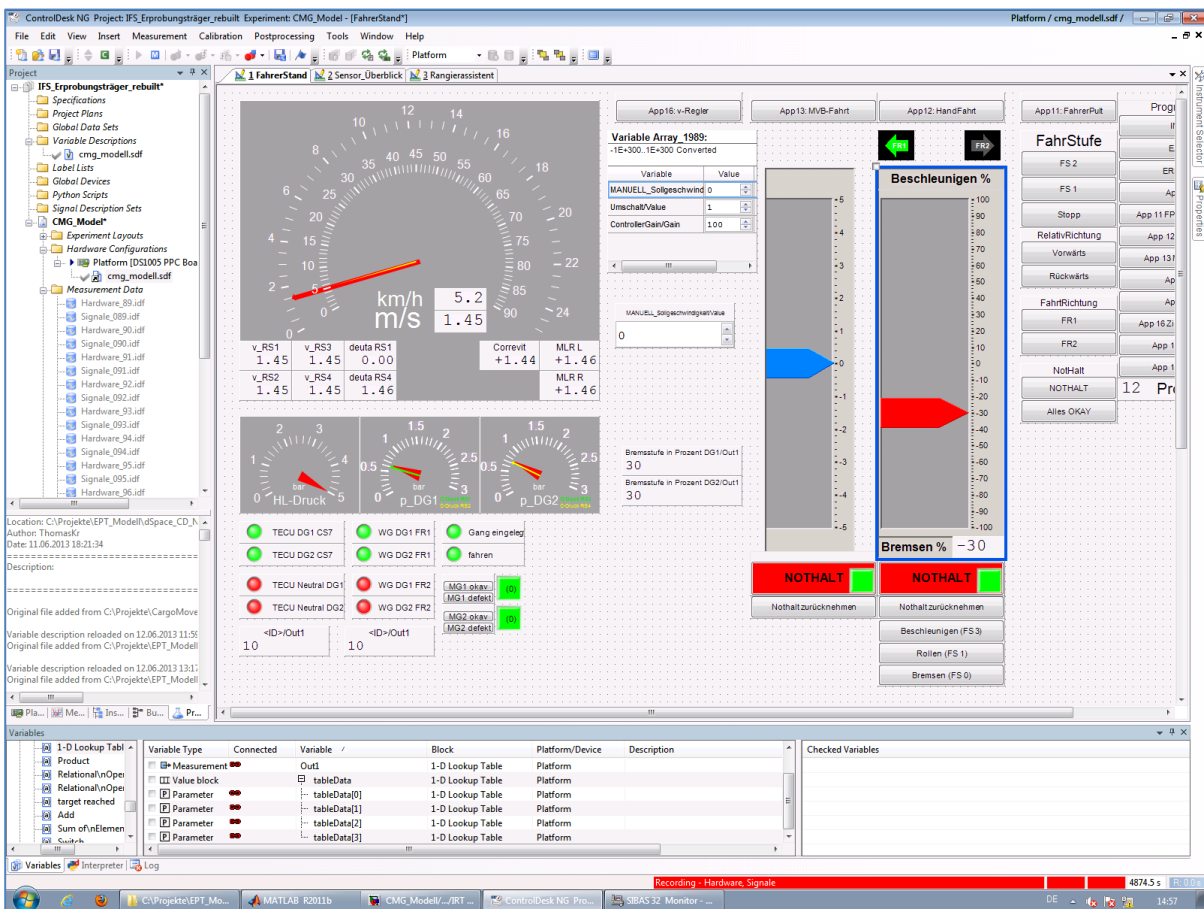


Abb. 118: Benutzeroberfläche des RCP-Systems mit dSPACE ControlDesk NG

A.3.1 Fahrerpult-Schnittstelle

An den Hilfsfahrerständen werden durch das Verbinden und Trennen von Kontakten einer Steuerleitung über Bedienhebel und Drucktasten elektrische Stellbefehle übertragen. Das RCP-System ist parallel über eine sogenannte „Fahrerpult-Schnittstelle“ mit dem Steuerkabel der Hilfsfahrerstände verbunden. Damit kann das RCP-System über digitale Ausgänge die Bedienung der Fahrerstände auf dem Steuerkabel vollständig nachbilden. Die „Fahrerpult-Schnittstelle“ hat zwei Betriebsmodi, um zwei unterschiedliche Ansteuerverfahren mit den selben elektrischen Kontakten abzubilden.

Der Normalmodus hat eine Richtungsvorgabe und folgende vier Fahrstufen:

- Stillstandsbremsung
- Fahrstufe 1 (3 km/h)
- Fahrstufe 2 (12 km/h)
- Rückwärts (−3 km/h) (nach Vorgabe der Vorwärtsrichtung: Fahrtrichtung FR1 oder FR2)

Die Geschwindigkeitssollwerte sind bis zur zugelassenen Höchstgeschwindigkeit von 80 *km/h* frei zu konfigurieren. (Die Erweiterung der Zulassung auf eine Höchstgeschwindigkeit von 120 *km/h* ist geplant.) Das Zentralsteuergerät hat einen eingebauten Geschwindigkeitsregler, der die Sollgeschwindigkeiten einregelt. In diesem Modus kann man aus dem Bürocontainer mit der RCP-Bedienoberfläche (siehe Abb. 118, Spalte „App 11 Fahrerpult“) das Fahrzeug ansteuern, wie wenn man an der Spitze des Fahrzeuges den Fahrhebel bewegen würde.

Im Betriebsmodus „RWTH“ (siehe Abb. 118, Spalte „App 12 Handfahrt“) bleibt die Richtungsvorgabe erhalten, aber die Fahrstufen werden anders interpretiert. Mit dem Schieberegler in der Benutzeroberfläche wird der Fahrzeugtechnik zwischen 100 % Traktionsanforderung und 100 % Bremsanforderung vorgegeben. Die Fahrstufen werden durch das RCP-System automatisch angesteuert. Um diese Funktion darstellen zu können, wird das Zentralsteuergerät teilweise umgangen. Hierzu wird die Fahrstufe 1 vom Zentralsteuergerät als freies Rollen ohne Traktion und Bremse interpretiert. Das RCP-System gibt parallel einen Bremsdrucksollwert an die zugeschalteten RCP-Bremssteuergeräte (Eigenentwicklung auf Basis eines NI-CompactRIO-Steuergerätes) aus. Durch eine potenzialfreie und galvanisch getrennte, analoge Schnittstelle zu den zwei Motorsteuergeräten wird eine Traktionsanforderung vorgegeben. Die Ansteuerung der Richtungsgetriebe sowie Sicherheitsfunktionen wie Fahrtfreigaben und NotAus bleiben unverändert.

Die Fahrerpult-Schnittstelle hat im Modus „RWTH“ eine Richtungsvorgabe und folgende vier Fahrstufen:

- Stillstandsbremsung (100 % Betriebsbremse)
- Fahrstufe 1, variable Beschleunigung/Verzögerung (–100 % ... 100 % Bremse/Traktion)
- Fahrstufe 2, konstante Beschleunigung (ungenutzt)
- Rückwärts (ungenutzt)

Als alternative Eingabemöglichkeit zur Fahrzeugsteuerung über Bildschirm und Maus wurde ein „RailDriver“-Fahrerstand an das RCP-System angeschlossen. Über die Hebelstellung lassen sich Traktions- und Bremsanforderungen variabel vorgeben. Weitere Hebel und Drucktasten können zur Direktvorgaben und zur Experimentsteuerung genutzt werden [123]. Beide Fahrzeugschnittstellen lassen sich durch die Benutzeroberfläche und durch andere Programme auf dem RCP-System ansteuern, z. B. für automatisierte Fahrbewegungen.

A.3.2 MVB-Schnittstelle zwischen RCP-System und Zentralsteuergerät

Eine weitere Möglichkeit dem Fahrzeug die Geschwindigkeit, Fahrtrichtung und weitere Parameter vorzugeben, besteht in der Übertragung der Daten über den MVB-Bus an das Zentralsteuergerät. Das Zentralsteuergerät (ZSG) basiert auf einem Siemens-Sibas32-Steuergerät und hat eine im CargoMover-Projekt entwickelte MVB-Bus-Schnittstelle für automatische Fahrbewegungen. Die Steuerbefehle werden von dem RCP-System über einen separaten CAN-Bus ausgesendet und in einem CAN-MVB-Gateway (Duagon D429) auf MVB-Ports umgesetzt. Das Zentralsteuergerät setzt im „CargoMover“-Modus die Stellsignale in Fahrbewegungen um.

A.4 Sensorik

Der „IFS-Erprobungsträger 1“ ist ein wissenschaftliches Versuchsfahrzeug, dessen Bewegungssensorik (Abb. 119) in die Kategorien Distanzsensorik, Geschwindigkeitssensorik, Inertialsensorik, Wegmarkensensorik, Positionssensorik und Satellitennavigation-Positionssensorik unterteilt wird. Die Sensoren werden im Folgenden einzeln vorgestellt. Die Eigenschaften der Sensoren sind im Hauptteil ab Abschnitt 5.9 als Sensormodelle beschrieben.

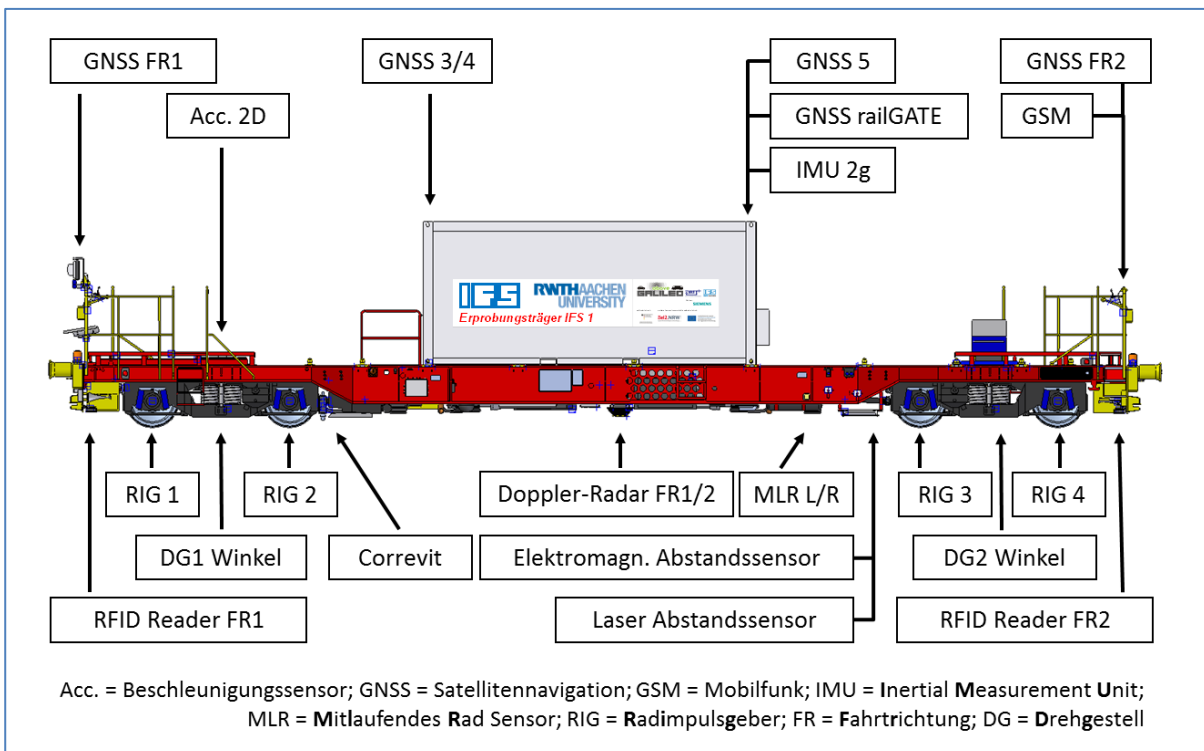


Abb. 119: CAD-Konstruktion mit wissenschaftlicher Bewegungssensorik des EPT1

Auf dem Fahrzeug wird die wissenschaftliche Sensorik durch das RCP-System eingelesen. Die Sensorik des Bremssystems, z. B. Radimpulsgeber, Drücke, usw. wird separat durch zwei RCP-Bremssteuergeräte eingelesen und für die Bremsdruck- und

Gleitschutzregelung verarbeitet. Mit einem CAN-Bus tauschen sich die RCP-Bremssteuergeräte und das RCP-System über Zustände, Messwerte und Sollwerte aus. Die Bremssteuergeräte speichern alle Mess- und Stellwerte lokal als Rohsignal auf USB-Sticks ab. In der Messdatenverarbeitung werden die Messdaten aller Steuergeräte auf UTC-Zeit synchronisiert.

A.5 Referenzsensorik für Geschwindigkeit und Distanz

Als Geschwindigkeitssensoren sind die Mitlaufenden Räder (Encoder-basiert), der Correvit-Rail Sensor, zwei Doppler-Radare und insgesamt sechs Radimpulsgeber an vier Radsätzen verfügbar.

Alle Sensoren (außer die Doppler-Radare) erzeugen ein Rechteck-Frequenzsignal, dessen Frequenz proportional zur Fahrgeschwindigkeit ist. Die Anzahl der Flanken ist proportional zur gefahrenen Distanz. Durch Integration des Geschwindigkeitssignals kann ein zweites Distanzsignal berechnet werden. Im Folgenden werden die einzelnen Sensoren vorgestellt.

A.5.1 Mitlaufendes Rad (Peiseler-Schlepprad)

Die im Automobilbereich als Peiseler-Schlepprad bekannte Methode eines momentfrei mitlaufenden Rades neben dem Fahrzeug wurde auf ein Schienenfahrzeug adaptiert. Das am Drehgestell über eine Schwinge angebrachte „Mitlaufende Rad“ (MLR, Abb. 120) wird über einen Federdämpfer auf die Schiene gepresst und läuft schlupffrei mit. Die Umdrehungen des Kunststoffrades werden mit einem integrierten Encoder (Hengstler 0 550 096, RI58-0/720AK.42RO) in ein Quadratur-Frequenzsignal gewandelt.



Abb. 120: Mitlaufendes Rad am Drehgestell in Fahrtrichtung FR2

Im RCP-System wird dasselbe elektrische Signal mit einem Frequenzeingang zur Geschwindigkeitsmessung und einem „Counter“-Eingang zur Distanzmessung eingelesen.

Der Sensor ist nur auf Teststrecken zugelassen und muss bei Überführungsfahrten über das öffentliche Gleisnetz je nach Lauffähigkeitsbescheinigung hochgebunden oder demontiert werden. Das Sensorrad hat einen Durchmesser von 280 mm. Mit einer Encoderauflösung von 720 Strich in zwei Kanälen ergibt sich eine Distanzauflösung von $ds_{MLR,min} = 0,6 \text{ mm}$. Die zwei MLR-Sensoren erzeugen die qualitativ besten und genauesten Distanz- und Geschwindigkeitssignale der auf dem IFS-Erprobungsträger verbauten konventionellen Odometriesensorik. Am Drehgestell DG2 sind an der Fahrzeuginnenseite für die linke und rechte Schiene je ein MLR-Sensor verbaut.

A.5.2 CORRSYS 3D CORREVIT RAIL 200

Ein weiterer Geschwindigkeits- und Distanzsensor ist der nach einem optischen Prinzip arbeitende CORRail-Correvit-Sensor (Abb. 121). Der Sensor wird an ein Drehgestell montiert und misst mit einem optischen Messverfahren [95, 124] (schlupfrei) die Relativgeschwindigkeit zwischen dem Drehgestellrahmen und der Schienenkopfoberfläche. Die im Bürocontainer verbaute Filterelektronik erzeugt weitere digitale Signale über Fahrtrichtung und interne Zustände.

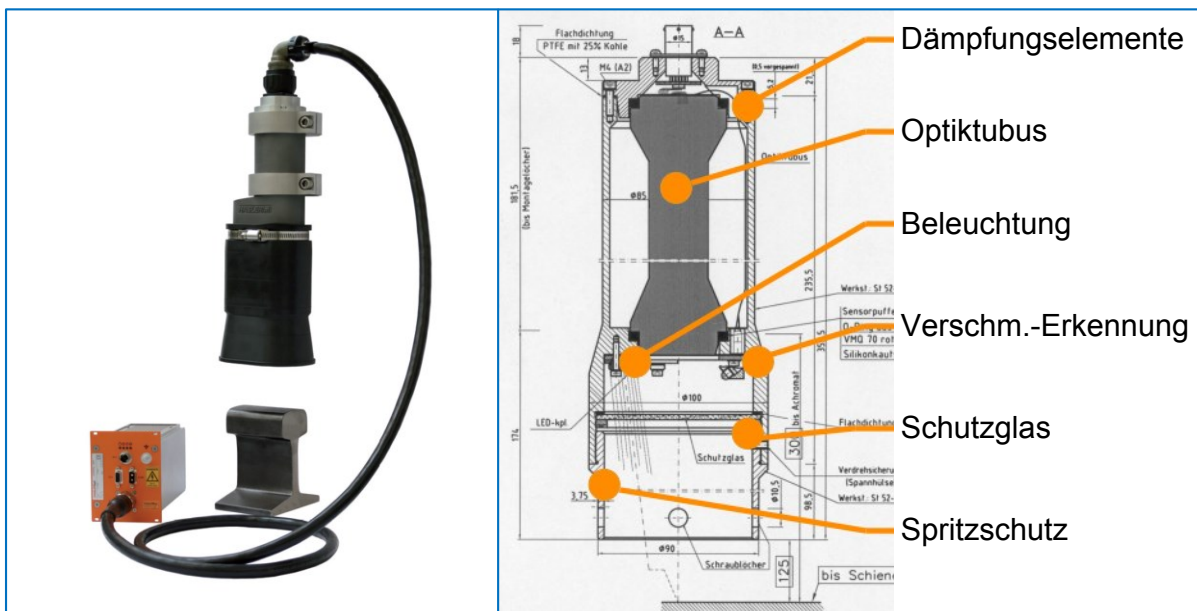


Abb. 121: links: Sensor Hasler CORRail 1000 [125], rechts: Schnittzeichnung [126]

Das Messprinzip basiert auf der Verarbeitung eines Lichtstromes, der von einem bewegten Objekt (mit einer stochastischen Oberfläche) reflektiert und durch ein optisches Gitter mit Lichtempfängern aufgenommen wird. Das Funktionsprinzip ist in

Abb. 122 skizziert. Zur detaillierten Funktionsweise sei auf die Veröffentlichungen [95, 124] verwiesen.

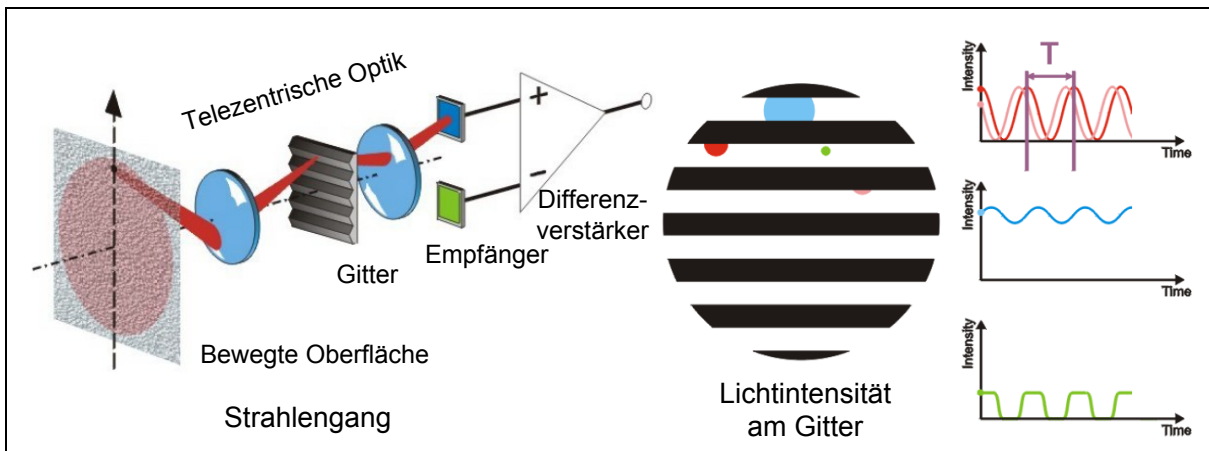


Abb. 122: Funktionsprinzip CORREVIT-Sensoren [126]

Der Sensor wird in verschiedenen Anwendungen im Bahnbereich von der Firma HASLERRail vertrieben. Im Automobilbereich werden Sensoren (von der Firma Kistler) mit diesem Sensorprinzip als eindimensional und zweidimensional messende Sensoren für Versuchsfahrten angeboten [127].

A.5.3 Radimpulsgeber

Radimpulsgeber (RIG, auch Wegimpulsgeber genannt) sind an allen Radsätzen eines Schienenfahrzeuges angebracht (siehe Abb. 9). Das Sensorprinzip ist in Abschnitt 2.4.1 beschrieben. Die an allen vier Radsatzwellen montierten Kodierscheiben weisen $n_{KS} = 80$ Zähne auf dem Umfang auf.

An jedem der vier Radsätze befindet sich ein einkanaliger Radimpulsgeber, der zur Geschwindigkeitsmessung, Stillstandserkennung sowie für den Gleit- und Schleuderschutz in das EBAS- und parallel in das RCP-Bremssteuergerät eingelesen wird. Zusätzlich sind an den äußeren Laufachsen (Radsatz RS1, Radsatz RS4) zweikanalige Radimpulsgeber für das RCP-System angebracht.

Das Zentralsteuergerät und das deaktivierte Zugsicherungs-Steuergerät Siemens ZUB262 messen die Radsatzdrehung durch weitere Radimpulsgeber und Encoder.

A.5.4 Doppler-Radar Deuta DRS05

Das Fahrzeug hat in beide Fahrtrichtungen zeigend je ein Doppler-Radar. Über zwei RS-485-Schnittstellen werden die Signale der Doppler-Radare mit einer Updaterate von 50 Hz im RCP-System aufgezeichnet und als zusätzliches Geschwindigkeitssignal in der Messdatenauswertung verwendet. Da es sich um einen integrierten Sensor für Zugsicherungssysteme handelt werden in dem seriellen Protokoll neben den

Geschwindigkeiten auch Integritätsdaten übertragen. Das Sensorprinzip ist in Abschnitt 2.4.3 beschrieben. Die Position und Ausrichtung der Sensoren ist in Anhang A.11.8 dokumentiert.

A.6 Inertialsensor (Inertial Measurement Unit, IMU)

Der integrierte Sensor (Microstrain 3DM-GX3-25) misst die mechanische Beschleunigung und Winkelgeschwindigkeit sowie die Richtung des Erdmagnetfeldes mit einer Abtastrate von 100 Hz. Zusätzlich wird eine 3x3 Drehmatrix im IEEE-754 Format zur Beschreibung der Sensorausrichtung im Erdkoordinatensystem ausgegeben [128]. Der Sensor befindet sich in einem schwingungsgedämpften Gehäuse in der Nähe der GNSS-3 Antenne auf dem Boschprofil des Bürocontainers in Fahrtrichtung FR2 (siehe Abb. 127). Die Position und Ausrichtung des Sensors ist in Anhang A.11.2 dokumentiert.

A.7 Wegmarken-Positionssensorik

Über verschiedene Sensoren wird der Zeitpunkt einer Vorbeifahrt an einem im Gleis verlegten oder verbauten Objekt erkannt. Diese Objekte werden hier zusammenfassend als Wegmarken bezeichnet. Den Wegmarken können eine Kilometrierung oder/und eine geodätische Position zugeordnet sein. Die drei Sensorsysteme: RFID-Sensorik, induktive Wegmarkensensorik und optische Wegmarkensensorik basieren auf unterschiedlichen physikalischen Messprinzipien und sind einander komplementär.

Der große Vorteil dieser Wegmarken-Positionssensorik besteht in der Möglichkeit, eine absolute Position zu einem bekannten Zeitpunkt messen zu können. Diese Positionsinformation ist unabhängig von der GNSS-Position, sodass die Wegmarkensensorik als komplementäres Sensorsystem zur Satellitennavigation angesehen werden kann. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, die Eigenschaften des GNSS-Systems in einem für Schienenfahrzeuge realistischen Anwendungsfall durch ein vollständig unabhängiges Sensorsystem zu validieren.

In den folgenden Abschnitten werden die drei Sensorsysteme und deren Messaufbauten auf dem IFS-Erprobungsträger vorgestellt. Anschließend wird in Anhang A.7.4 eine integrierte Wegmarke vorgestellt, die von allen Wegmarkensensoren erkannt und vermessen werden kann.

A.7.1 UHF-RFID Transponder-Empfänger-System

Ein RFID-System besteht aus einem Transponder (RFID-Tag) und einem Empfängersystem aus RFID-Antenne und RFID-Empfängerelektronik bzw. Steuergerät (RFID-Reader). In diesem Anwendungsfall ist der RFID-Tag im Gleis verlegt, und das Empfängersystem befindet sich auf dem IFS-Erprobungsträger. Kommt der RFID-Tag in den Empfangsbereich der RFID-Antenne, dann kann das RFID-Empfängersystem den RFID-Tag auslesen.

Als intelligente Positionsreferenz wurde eine UHF-RFID-Anlage auf dem IFS-Erprobungsträger installiert. An beiden Spitzen und in der Mitte des Fahrzeuges sind in Richtung des Gleisbettes ausgerichtete RFID-Antennen (Intermec IA36A, Abb. 123) angebracht. Zur Ansteuerung der Antennen sind RFID-Steuergeräte (Intermec IF61) verbaut.

Als Wegmarken werden RFID-Tags (Intermec IT67) in die Mitte der Schwellen gelegt. Auf der integrierten Wegmarke (Anhang A.7.4) befindet sich ebenfalls ein RFID-Tag. Als wichtigste Information beinhalten die Transponder eine ganzzahlige Nummer, die jeden RFID-Tag eindeutig identifiziert. Auf die Nutzung des erweiterten Speichers des RFID-Transponders wurde bewusst verzichtet, um eine minimale Auslesezeit von $4..8\text{ ms}$ für eine Einzelauslesung zu erreichen.



Abb. 123: Einbausituation von RFID-Antenne und RFID-Empfänger an der Innenseite der Frontschürze in Fahrtrichtung FR1

Das RFID-System funktioniert folgendermaßen: Fährt das Schienenfahrzeug über ein RFID-Tag, dann wird der RFID-Transponder nacheinander von allen Antennen unter dem Fahrzeug ausgelesen. Der Empfangsbereich einer RFID-Antenne unter dem Fahrzeug beträgt rund 2 Meter. Um die Position des Transponders relativ zum vorüberfahrenden Schienenfahrzeug genauer bestimmen zu können, wird der

Transponder so schnell und oft wie möglich ausgelesen, und zusätzlich wird die empfangene Signalstärke aufgezeichnet. Die Signalstärke wird maximal, wenn sich der Transponder direkt unter der Antenne befindet. Über eine Signalverarbeitung wird das Peakmaximum als geschätzter Zeitpunkt der Überfahrt bestimmt. Ein RFID-Steuergerät kann alle drei Antennen im Multiplex-Betrieb auslesen. Dies vervielfacht jedoch die Zeitdauer zwischen zwei Auslesungen. Daher wurde die Konfiguration im SiPoS-Rail Projekt erweitert, sodass jede Antenne von einem RFID-Steuergerät angesteuert wird. Abschnitt 5.11.3 beschreibt im Rahmen der Vorstellung des Sensormodells die Signaleigenschaften des Sensorsystems. Abb. 101 zeigt charakteristische Messdaten dieses Systems.

A.7.2 Induktiver Wegmarkensensor

Ein induktiver Abstandssensor Proxitron MKU 215.19 [129] (Abb. 124) erkennt ferromagnetische Gegenstände im Gleis als „Güteänderung eines Resonanzschwingkreises, der durch Wirbelstromverluste in leitfähigem Material verursacht wird“ [129]. In Abhängigkeit von der Größe des Gegenstandes und dem Abstand zum Gegenstand gibt der Sensor ein charakteristisches analoges Spannungssignal aus. So können Weichen, Betonschwellen oder andere bewusst verlegte Metallgegenstände gemessen werden. Weichenzungen werden als metallische Gegenstände durch charakteristische Peaks in der steigenden und fallenden Flanke erkannt.

Der Sensor überwindet den aus dem Lichtraumprofil [130, 131] vorgegebenen Höhenabstand von 150 mm zwischen Fahrzeugunterseite und Schienenoberkannte.

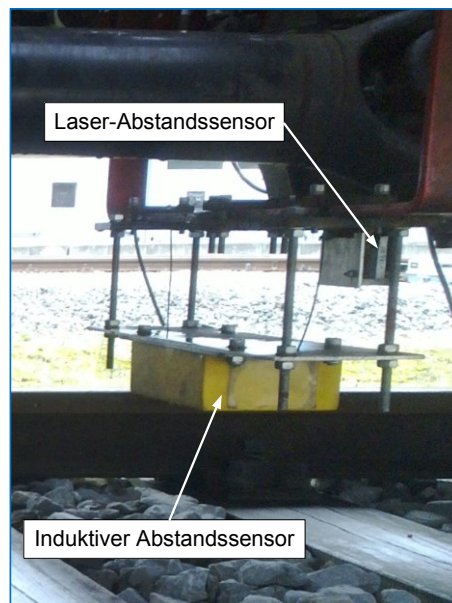


Abb. 124: Induktiver Abstandssensor und Laser-Abstandssensor unter der Antriebswelle in Fahrtrichtung FR2

Der Sensor befindet sich nahe der Gleismitte. Die genaue Position des Sensors ist in Anhang A.11.7 dokumentiert. (Eine interessante Erweiterung wäre der von Geistler [94] beschriebener Wirbelstromsensor, der seitlich über dem Schienenkopf angebracht wird.)

A.7.3 Laser-Abstandssensor

In der Fahrzeugmitte ist neben dem induktiven Wegmarkensensor ein vertikal in das Gleisbett gerichteter Laser-Abstandssensor angebracht. Dieser misst den geometrischen Abstand zwischen Fahrzeug-Wagenkasten und dem Gleisbett. Werden große Abstandsänderungen gemessen, ist dies ein Hinweis auf ein Objekt im Gleis. Der Laser-Abstandssensor kann Objekte mit einer zeitlichen Auflösung von 400 Hz vermessen und erzeugt an den Rändern der integrierten Wegmarke steile Flanken. Die Distanzauflösung in Fahrtrichtung ist geschwindigkeitsabhängig. Bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h ergibt sich ein Messpunktabstand von 55 mm.

A.7.4 Integrierte Wegmarke

Im Projekt SiPoS-Rail wurde eine kombinierte Positionsmarke entwickelt, die mit verschiedenen Wegmarkensensoren vermessen werden kann. Die Wegmarken werden vor einer Testfahrt auf eine Schwelle im Gleis gestellt. Wie in Abb. 126 dargestellt, kann die Position der Wegmarke mit einem GNSS-Empfänger geodätisch eingemessen werden.

Abb. 125 zeigt die Wegmarke im Detail. Auf der Hauptwegmarke befindet sich ein blauer RFID-Tag (Intermec IT67). Aus dem RFID-Transponder kann die Nummer der Wegmarke ausgelesen werden. Unter dem RFID-Tag befindet sich eine beschichtete, diffus reflektierende Aluminiumdeckplatte, die den Laserstrahl des Laser-Abstandssensors (Anhang A.7.3) besonders gut reflektiert. Durch die scharfe Kante der Deckplatte und den Höhenunterschied zum Gleisbett ist eine charakteristische Distanzänderung durch den Laser-Abstandssensor messbar. Die Breite der Deckplatte ist so bemessen, dass der Laser-Abstandssensor über den lateralen Toleranzbereich des Wagenkastens und mögliche Rollbewegungen immer die Aluminiumdeckplatte trifft.

Unter der Aluminiumdeckplatte befindet sich ein Quader aus ferromagnetischem Material, auf das der induktive Abstandssensor (Anhang A.7.2) reagiert. Der Sockel der Wegmarke hebt die signalempfindlichen Bauteile soweit an, dass sich der oberste RFID-Transponder wenige Millimeter unter der Schienenoberkante als Grenze des erlaubten infrastrukturseitigen Lichtraumprofils [131] befindet.

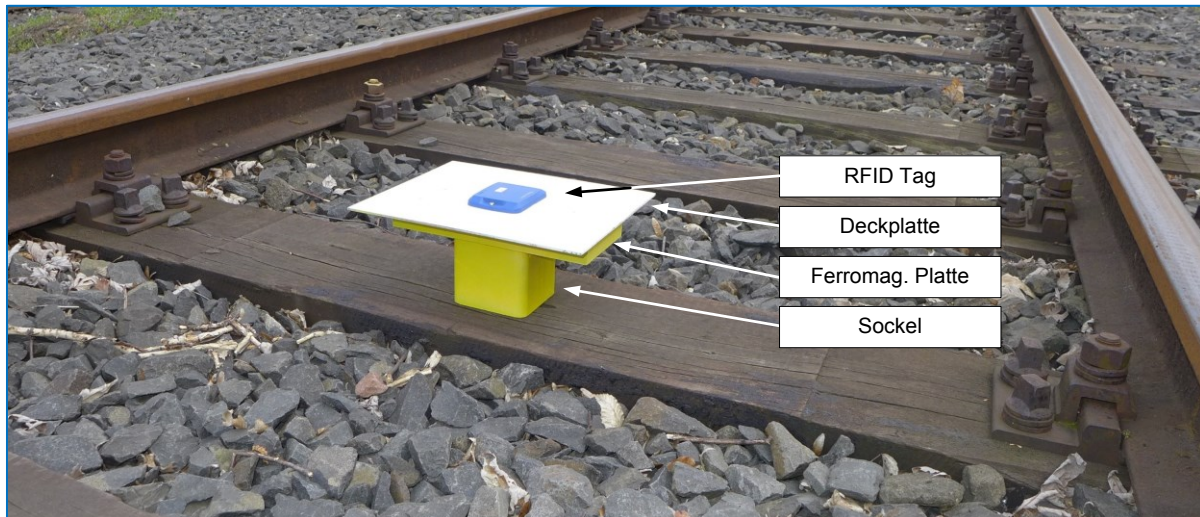


Abb. 125: Integrierte Wegmarke (Hauptwegmarke)

In Abb. 126 ist der Messaufbau des RFID-Systems aus einer Hauptwegmarke und zwei Hilfswegmarken bei der geodätischen Vermessung der Hauptwegmarke dargestellt.

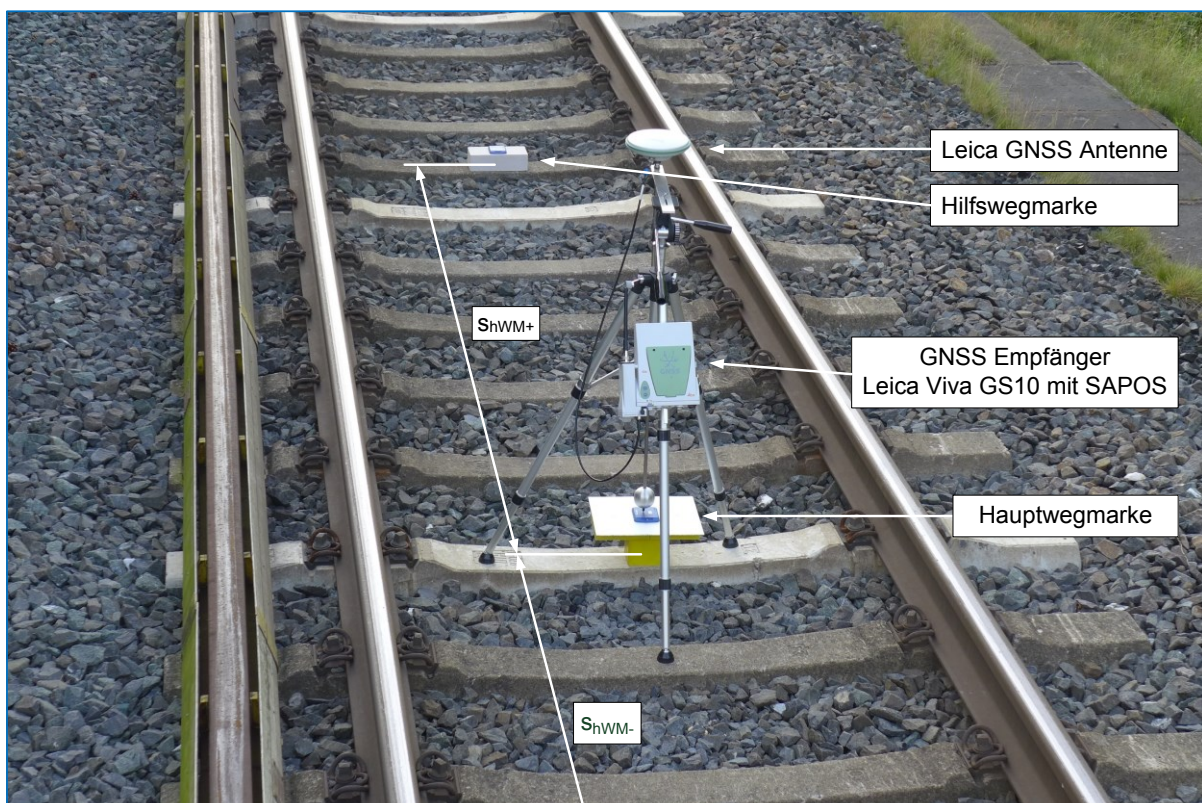


Abb. 126: Geodätische Vermessung einer integrierten Wegmarke auf dem Testring T1 im PCW auf der Testfahrt am 24.07.2014

A.7.5 Erkennung und Vermessung der integrierten Wegmarke

In einem grundlegenden Postprocessing werden die gespeicherten Rohdaten aller auf dem IFS-Erprobungsträger eingelesenen Sensorsysteme zu Sensorsignalen aufbereitet und in einer zusammengefassten MATLAB-Datenstruktur abgespeichert. Darauf aufbauend werden die Sensorsignale der Positionssensoren genutzt, um die im vorangegangenen Abschnitt beschriebene integrierte Wegmarke zu vermessen. Die Sensorfusion wird nach folgendem Verfahren durchgeführt:

Um die Wegmarken von anderen Objekten im Gleis unterscheiden zu können, werden im ersten Schritt die RFID-Signale ausgewertet. Die Haupt- und Hilfswegmarken sind die einzigen Objekte mit einem UHF-RFID-Transponder, sodass dieses Signal selektiv die Wegmarken erkennt. Bei der Überfahrt des IFS-Erprobungsträgers über die Wegmarke wird der RFID-Tag auf der Wegmarke von den RFID-Systemen an den zwei Fahrzeugspitzen eingelesen. Für jede RFID-Antenne werden separat die Einzelmessungen mit derselben Tag-ID zu einer Transponder-Auslesung zusammengefasst. Der RFID-Transponder wird nacheinander erst von dem RFID-System an der (in Fahrtrichtung) vorderen Fahrzeugspitze und dann von der hinteren Fahrzeugspitze eingelesen und zu einer Überfahrt kombiniert.

Wenn zwei RFID-Transponder einen geringen Abstand aufweisen, kommt es dadurch im Übergangsbereich zu wechselnden Auslesungen beider RFID-Transponder. Ein weiterer zu beachtender Sonderfall ist, wenn sich das Schienenfahrzeug zu Beginn einer Messung über einem RFID-Tag befindet. Dann wird nur eine Antenne den Transponder auslesen. Das Fahrzeug kann auch während einer Überfahrt über eine Wegmarke die Fahrtrichtung wechseln, sodass der RFID-Tag von einer Antenne zweimal und von der anderen Antenne nicht ausgelesen wird. Über die Tag-ID ist jede Einzelmessung eindeutig einer Wegmarke zuzuordnen.

Die Signalintensität (RSSI) der Einzelmessungen des RFID-Systems bilden, über der Distanz aufgetragen, eine Intensitätskurve (siehe Abb. 101). Mit verschiedenen Auswerteverfahren werden durch eine robuste Peakerkennung und Vermessung (z. B. Peakmaximum, Peakschwerpunkt, usw.) der Zeitpunkt und die Distanz seit Messbeginn für die Überfahrt über den RFID-Transponder (und damit über die Wegmarke) bestimmt. Zu diesem Zeitpunkt wird angenommen, dass sich die Antenne mittig über dem RFID-Tag befunden hat. Aus den geometrischen Verhältnissen auf dem Fahrzeug und der Fahrtrichtung werden für die induktive und optische Sensorik Distanzbereiche definiert, in denen die Sensoren die Wegmarke passiert haben müssen. Auf die Distanzbereiche werden ebenfalls angepasste Algorithmen zur Peakerkennung und Vermessung angewendet. Besonders der Laser-Abstandssensor

kann durch die gegenüber dem RFID-System hohe Flankensteilheit die integrierte Wegmarke genauer vermessen.

Als Ergebnis dieses Verfahrens entsteht eine Liste mit folgenden zusammengefassten Eigenschaften der erkannten Wegmarken:

- Laufnummer der erkannten Wegmarke
- RFID Tag-ID = Nummer der Wegmarke
- Zeitdauer seit Messbeginn (kann später auf UTC umgerechnet werden)
- Distanz auf Fahrweg (kann später in Kilometrierung und weitere Positionsbeschreibungen umgerechnet werden)

Die ausgewerteten Sensorsignale der Einzelmessungen werden ebenfalls abgespeichert.

A.8 GNSS-Positionssensorik

GNSS-Sensoren bilden eine besondere Gruppe von Positionssensoren, da hier eine absolute dreidimensionale Position (auf der Erdoberfläche) gemessen wird.

Über das Schienenfahrzeug verteilt befinden sich mehrere GNSS-Sensoren, die im Folgenden vorgestellt werden. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, GNSS-Signale mit unterschiedlicher Signalqualität und an unterschiedlichen Positionen auf dem Schienenfahrzeug durch GNSS-erweiterte Odometriealgorithmen untersuchen zu können. Die Position aller GNSS-Antennen ist in Anhang A.11.1 dokumentiert.

Unabhängig von der Positionsgenauigkeit weisen alle Arten von GNSS-Sensoren eine sehr genaue Absolutzeit auf. Über Zeitpulse und Zeitstempel kann dies zur Synchronisierung von weit entfernten Steuergeräten auf dem Schienenfahrzeug und auf anderen Fahrzeugen oder der Infrastruktur verwendet werden.

A.8.1 GNSS-Einfrequenz-Empfänger (GNSS-FR1, GNSS-FR2)

Diese Klasse an Empfängern kann nur das L1-Frequenzband der GNSS-Satelliten empfangen. Die Positionsgenauigkeit liegt bei mehreren Metern. Die Sensoren sind jedoch relativ günstig und werden für Consumer-Anwendungen wie Mobiltelefone und Navigationsgeräte eingesetzt. Die funktionalen Eigenschaften der Sensoren werden in Abschnitt 5.12.1 als Sensormodell beschrieben. An beiden Fahrzeugspitzen werden Evaluationsgeräte ublox EVK-5T/EVK-6T mit einer Patchantenne (GNSS-FR1, GNSS-FR2) verwendet.

Die Sensoren haben eine serielle Schnittstelle, die über RS-232 (D-Sub, 9-poliger Stecker) oder USB (USB-2.0-Typ-B-Buchse) angeschlossen wird. Es können mehrere Protokolle, darunter das standardisierte NMEA-Protokoll und das herstellereigene UBX-Protokoll übertragen werden. Neben der im Sensor berechneten Positionslösung

sind auch GNSS-Rohdaten verfügbar. Die Einbausituation der Empfängerelektronik ist in Abb. 123 dargestellt.

A.8.2 Zweifrequenz-Empfänger (GNSS-4)

Für professionelle Anwendungen mit einer angestrebten Positionsgenauigkeit von unter einem Meter werden Zweifrequenzempfänger eingesetzt. Der Aufbau von Antenne und Empfänger ist aufwendiger, sodass die Sensoren größer und teurer als Einfrequenzempfänger sind.

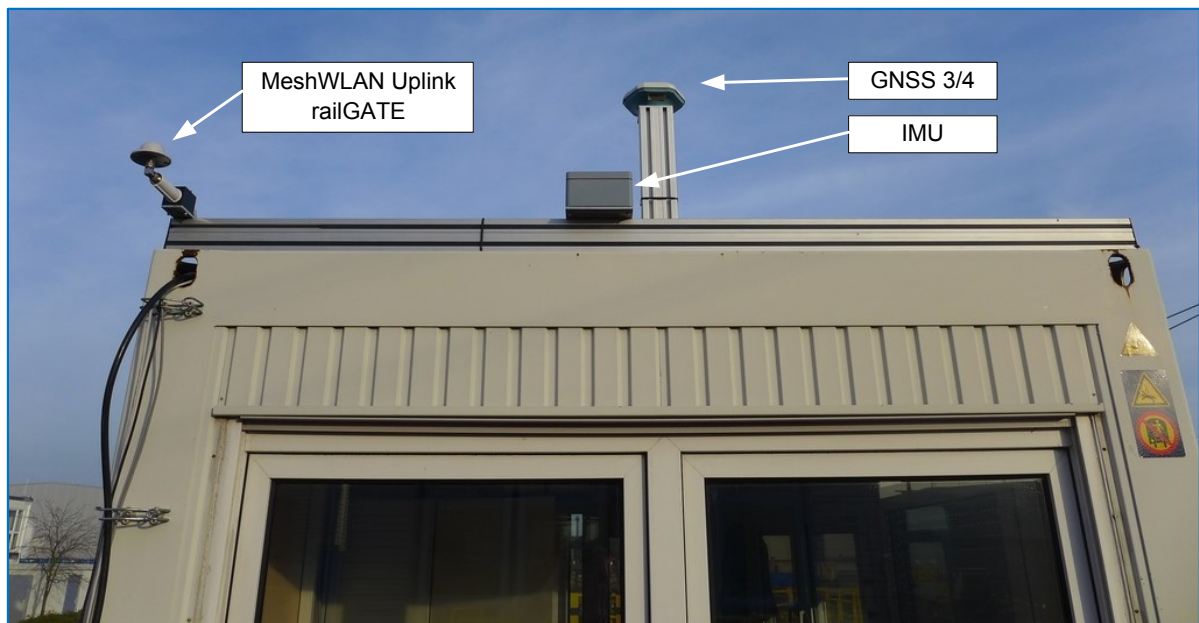


Abb. 127: IFS-Erprobungsträger Bürocontainer in Fahrtrichtung FR2

Als Zweifrequenzempfänger mit der Bezeichnung GNSS-4 wird ein Sensor Septentrio AsteRx3 HDC eingesetzt. Die Antenne befindet sich auf dem Boschprofil des Bürocontainers in Fahrtrichtung FR2 (siehe Abb. 116 und Abb. 127 über dem Fenster des Bürocontainers). Der Sensor sendet über mehrere RS-232-Schnittstellen NMEA-Botschaften und GNSS-Rohdaten im Binärformat SBF [65] an das RCP-System.

A.8.3 GNSS-Referenz-Empfänger (GNSS-3)

Der GNSS-3 Empfänger Leica Viva GS10 hat als Zweifrequenzempfänger zusätzlich eine SAPOS-Schnittstelle, um mit Korrekturdaten die Positionslösung zu verbessern. Hierzu werden über eine GSM-Datenverbindung Echtzeit-Korrekturdaten von einem SAPOS-Server abgerufen. Diese Sensoren werden zur Landesvermessung (Geodäsie) eingesetzt und weisen eine 3D-Messabweichung von kleiner 30 mm auf. Dieser Sensor wird als genauester GNSS-Sensor auf dem IFS-Erprobungsträger zur Erzeugung einer Referenzposition oder Referenztrajektorie verwendet.

Über eine Antennenweiche sind der GNSS-3 Empfänger und der GNSS-4 Empfänger an dieselbe Antenne angeschlossen. Die Kombination der zwei GNSS-Empfänger (GNSS-3 und GNSS-4) an einer Antenne ist vorteilhaft, um erweiterte Odometriealgorithmen auf Basis der GNSS-Rohdaten des Zweifrequenzempfängers (GNSS-4) durch die genaueren Positionsdaten des GNSS-Referenzempfängers (GNSS-3) zu validieren.

A.8.4 railGATE-Benutzersegment (GNSS-5)

Die von den Pseudolitensendern der railGATE-Testumgebung (Abschnitt 3.3.3) ausgesendeten GNSS-Signale werden von speziellen railGATE-Empfängern (Abb. 128) empfangen. Diese Empfänger basieren auf einem modifizierten Septentrio-Zweifrequenzempfänger. Über eine spezielle Mesh-WLAN-Schnittstelle empfängt der Sensor Korrekturdaten von einer Referenzstation und verbessert damit seine Positionslösung. Die GNSS-Daten werden im NMEA- und SBF-Format an einer seriellen RS-232-Schnittstelle ausgegeben und auf einer integrierten Festplatte gespeichert [132].



Abb. 128: RailGATE-Benutzersegment (Empfänger) mit Antenne (Quelle: ARIC)
Der railGATE-Empfängergehäuse befand sich im 19-Zoll-Schrank (im Bürocontainer) auf dem IFS-Erprobungsträger.

A.9 Allgemeine Parameter des Versuchsfahrzeuges „IFS-Erprobungsträger 1“

In diesem Abschnitt werden zur Übersicht die allgemeinen mechanischen Parameter des Schienenfahrzeuges dokumentiert. Die Tabellen und Daten sind dem IFS-Bericht 02/2010 von Kampfpeter [133] entnommen. Die Parameter werden in den Mehrkörpersimulationsmodellen in Abschnitt 5.8.2 verwendet.

A.9.1 Gesamtfahrzeug und Wagenkasten

Tabelle 4: Gesamtfahrzeugparameter des Versuchsfahrzeuges „IFS-Erprobungsträger 1“

Größe	Quelle	Wert	Einheit
Wagenkasten Länge über Puffer	[134]	20190	mm
Länge des Wagenkastens (x)	[134]	18950	mm
Maximale Breite Wagenkasten (y)	[134]	2900	mm
Ladehöhe Wagenkasten		1130	mm
Höhe Seitenträger (z)		680	mm
Drehkranzabstand	[134]	13950	mm
Eigenmasse EPT1	[134]	40500	kg
Dienstmasse EPT1	[134]	41000	kg
Max. Zuladung EPT1	[134]	35800	kg
Masse Wagenkasten EPT1		28000	kg
Trägheitstensor Wagenkasten EPT1	Siehe Formel (56)	$\begin{bmatrix} 20702 & 0 & 0 \\ 0 & 838984 & 0 \\ 0 & 0 & 857529 \end{bmatrix}$	kgm ²

Die überschlägig berechneten Massenträgheitsmomente wurden mithilfe der Masse, der Abmaße und der Formel für Massenträgheitsmomente für Quader bestimmt:

$$J_{zz} = \frac{1}{12} \cdot m \cdot (x^2 + y^2) \quad (56)$$

A.9.2 Drehgestellrahmen

Tabelle 5: Drehgestellparameter des Versuchsfahrzeuges „IFS-Erprobungsträger 1“

Größe	Quelle	Wert	Einheit
Länge (x)	[135]	3550	mm
Breite (y)	[135]	2720	mm
Höhe (z)	[135]	905	mm
Höhe Lichtraumprofil		150	mm
Achsabstand	[135]	2500	mm
Masse Drehgestell (angenommen)		2500	kg

Trägheitstensor Drehgestellrahmen	Siehe Formel (56)	$\begin{bmatrix} 1660 & 0 & 0 \\ 0 & 2744 & 0 \\ 0 & 0 & 4166 \end{bmatrix}$	kgm ²
--------------------------------------	-------------------------	--	------------------

A.9.3 Radsätze

Tabelle 6: Parameter der Radsätze auf dem Versuchsfahrzeuges „IFS-Erprobungsträger 1“

Größe	Quelle	Wert	Einheit
Raddurchmesser neu (r)	[134]	920	mm
Raddurchmesser alt	[134]	840	mm
Stützweite	[112]	1500	mm
Radprofil	[134]	S1002 / DIN 5573	
Masse Triebradsatz (m)	[136]	1986	kg
Masse Laufradsatz	[136]	1962	kg
Trägheitstensor Triebradsatz neu	Siehe Formel (57), (58)	$\begin{bmatrix} 967 & 0 & 0 \\ 0 & 162 & 0 \\ 0 & 0 & 967 \end{bmatrix}$	kgm ²

Für die Radsätze wurden die Massenträgheitsmomente mit der Formel für Vollzylinder bei Rotation um die Symmetrieachse

$$J = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 \quad (57)$$

und mit der Formel für Vollzylinder bei Rotation um eine Achse senkrecht zur Symmetrieachse

$$J = \frac{1}{4} \cdot m \cdot r^2 + \frac{1}{12} \cdot m \cdot l^2 \quad (58)$$

und den nötigen Steiner-Anteilen abgeschätzt. Die Größenordnung der Zahlenwerte wurde mit den Werten des MD52-Fahrwerks aus [137] auf Plausibilität überprüft.

A.9.4 Federstufen

Tabelle 7: Parameter der Primär- und Sekundärfederung auf dem Versuchsfahrzeuges „IFS-Erprobungsträger 1“

Größe	Quelle	Richtung			Einheit
		x	y	z	
Primäre Federstufe					
Element zwischen Radsatzlager und Drehgestellrahmen (2 je Achse)					
Federsteifigkeit	[135]	20000	20000	3300	$\frac{\text{N}}{\text{mm}}$
Dämpfung	[135]	0,7	0,7	40 (Zug) 20 (Druck)	$\frac{\text{Ns}}{\text{mm}}$
Sekundäre Federstufe					
Element zwischen Drehgestellrahmen und Wagenkasten (2 je Drehgestell)					
Federsteifigkeit	[135]	200	200	2672	$\frac{\text{N}}{\text{mm}}$
Dämpfung	[135]	197,0 (Zug) 187,1(Druck)	26,1	26,5	$\frac{\text{Ns}}{\text{mm}}$

A.9.5 Bürocontainer

Der Bürocontainer auf dem IFS-Erprobungsträger entspricht einem 20-Fuß-Container nach ISO 668 [138].

Tabelle 8: Parameter des Bürocontainers auf dem Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“

Größe	Quelle	Wert	Einheit
Masse (max. nach Norm)	[138]	24000	kg
Länge (x)	[138]	6,058	m
Breite (y)	[138]	2,438	m
Höhe (z)	[138]	2,591	m
Maximaler Trägheitstensor Container	Siehe Formel (56)	$\begin{bmatrix} 25314 & 0 & 0 \\ 0 & 86825 & 0 \\ 0 & 0 & 85286 \end{bmatrix}$	kgm^2
Masse Bürocontainer	geschätzt	4000	kg
Massenträgheitsmoment Bürocontainer	Siehe Formel (56)	$\begin{bmatrix} 4219 & 0 & 0 \\ 0 & 14470 & 0 \\ 0 & 0 & 14214 \end{bmatrix}$	kgm^2

A.10 Koordinatensysteme des Versuchsfahrzeuges

Das Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ wurde in den vorangegangenen Abschnitten des Anhangs A mit seinen allgemeinen technischen Eigenschaften und Ausstattung ausführlich vorgestellt. Dieser Abschnitt zeigt darauf aufbauend die Systematik der Positionsbeschreibung auf dem Versuchsfahrzeug. Zunächst werden die Körperkoordinatensysteme und deren Lage und Beziehung zueinander definiert. Die Positionen der verbauten Sensorik wird anschließend in Anhang A.11 systematisch beschrieben.

Diese hier dargestellte Methode führt zu einer systematischen und eindeutigen Positionsbeschreibung auf dem Versuchsfahrzeug über den gesamten Arbeitsbereich, von der praktischen Arbeit am Versuchsfahrzeug, der Mehrkörpersimulation und der Koordinatentransformation.

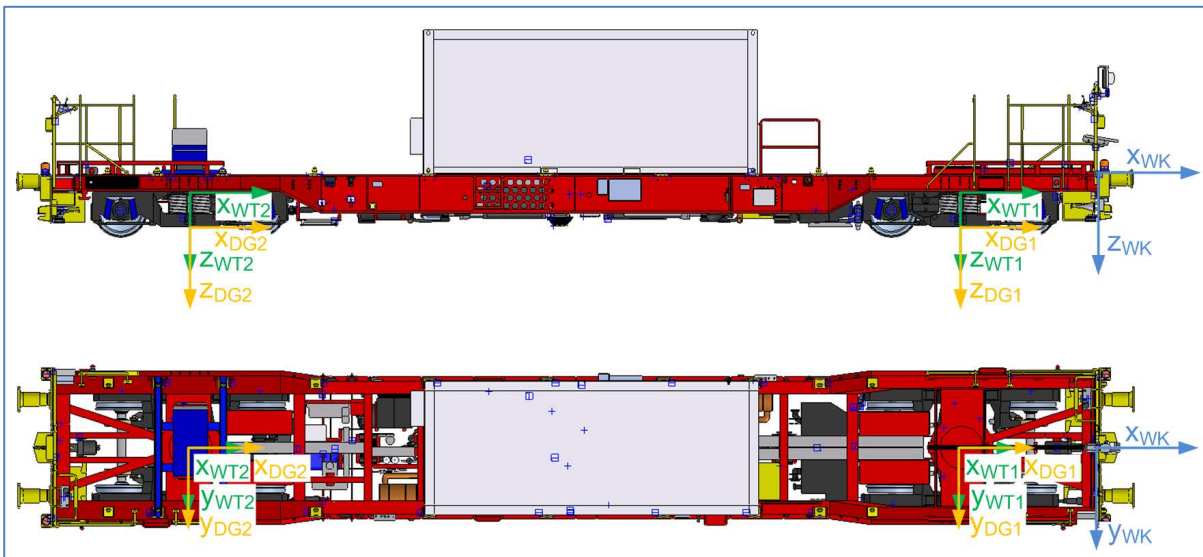


Abb. 129: Darstellung der Koordinatensysteme des Versuchsfahrzeuges „IFS-Erprobungsträger 1“ am CAD-Modell, Seitenansicht (oben), Draufsicht ohne Abdeckplatten (unten)

In der praktischen Arbeit auf einem Schienenfahrzeug müssen alle Positionen messbar sein, sonst sind die Positionsbeschreibungen nicht verwendbar. Die Lage der verschiedenen Koordinatensysteme muss an realen Bauteilen abgeleitet werden können. Nur so lassen sich in den lokalen Koordinatensystemen beschriebene Positionen auf dem realen Schienenfahrzeug bestimmen. Aus der Definition der Koordinatensysteme leitet sich eine Modellvorstellung über die geometrischen Zusammenhänge auf dem Schienenfahrzeug ab. Diese Modellvorstellung kann direkt in Mehrkörpersimulationsmodellen umgesetzt werden. Die am realen Versuchsfahrzeug gemessenen Positionen lassen sich in den Mehrkörpersimulationsmodellen ohne weitere Umrechnung verwenden.

Im Folgenden wird diese Methodik auf das Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ angewendet. An den großen, sich relativ zueinander bewegenden Fahrzeugteile Wagenkasten, Wiegenträger und Drehgestelle wird je ein eigenes körperfestes Koordinatensystem definiert (Abb. 129). So lassen sich allgemeine Positionen und die Lage von Anbauteilen auf dem Fahrzeug systematisch beschreiben.

Die körperfesten Koordinatensysteme werden an markanten und am realen Fahrzeug messbaren Kanten und Flächen definiert. Die an den Fahrzeugteilen angebrachten Sensoren sind in den Koordinatensystemen der Fahrzeugteile verortet. Die Messauflösung beträgt 1 mm . Die Koordinaten wurden mit einem Stahlmaßband gemessen oder aus CAD-Zeichnungen übernommen.

Die beschriebenen Bewegungen zwischen den Koordinatensystemen werden in der Messdatenauswertung des IFS-Erprobungsträgers benutzt. Die Koordinaten können zwischen den Koordinatensystemen durch Koordinatentransformation umgerechnet werden. In einem ersten Schritt sollen die für die beschriebenen Koordinatensysteme maßgebenden Bezugspunkte für die Ausrichtung und den Koordinatenursprung beschrieben werden.

A.10.1 Wagenkasten-Koordinatensystem (KS-WK)

Als Wagenkasten wird der meist rot gestrichene Wagenkastenrahmen angesehen, der die beiden Drehgestelle hält und auf dem der Bürocontainer steht. Für den Wagenkasten wird nur ein Koordinatensystem definiert, sodass der Wagenkasten als starrer Körper angenommen wird.

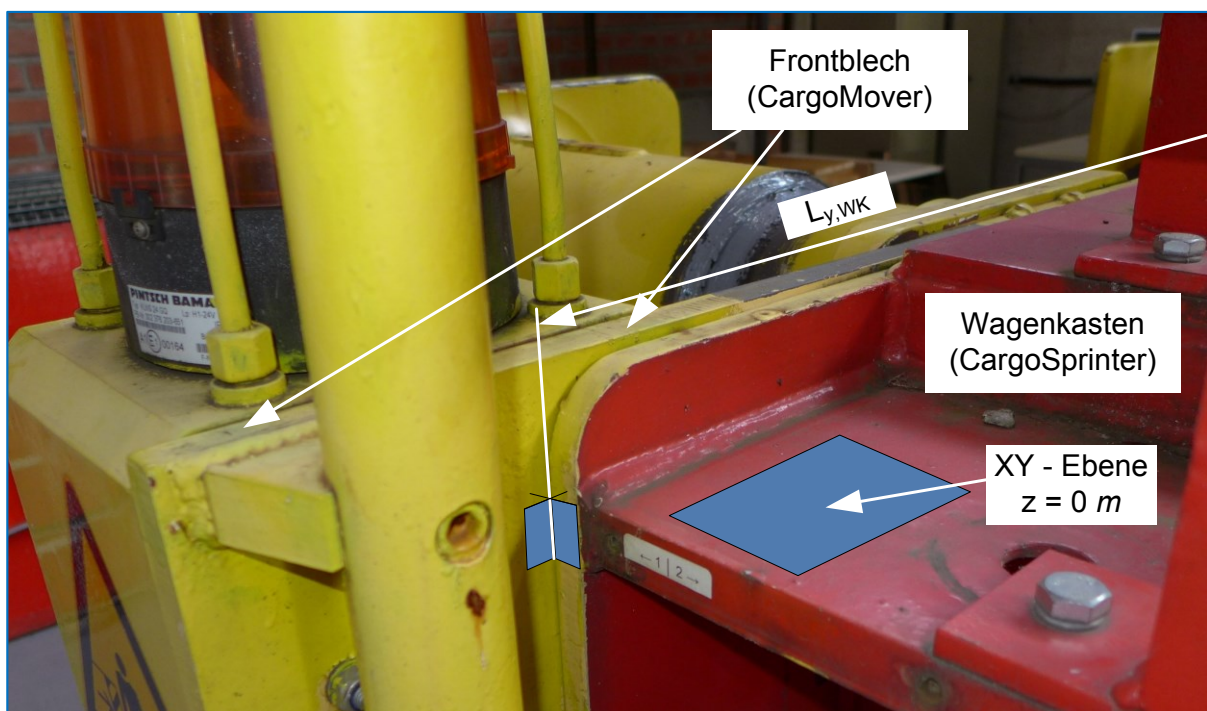


Abb. 130: Definition der Messpositionen für KS-WK in Fahrtrichtung FR1

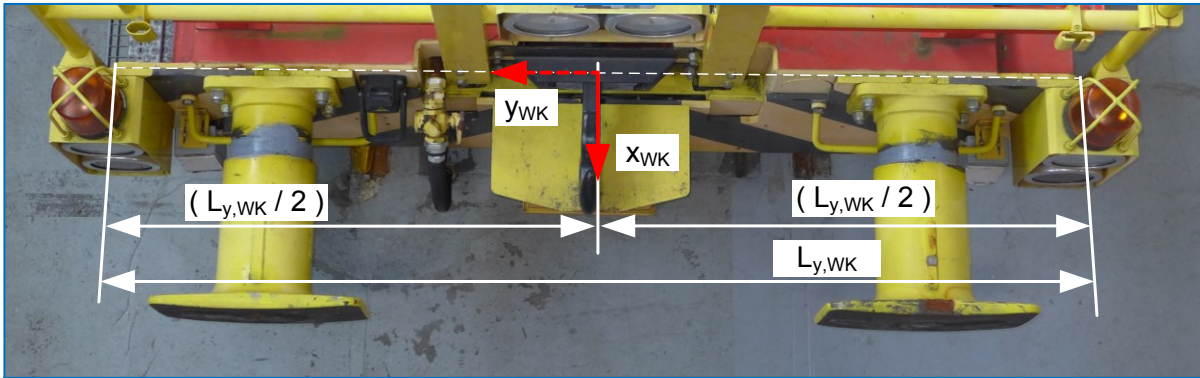


Abb. 131: Geometrische Beschreibung des Wagenkasten-Koordinatensystems KS-WK an der Fahrzeugspitze in Fahrtrichtung FR1

Die XY-Ebene soll sich auf der oberen Oberfläche der beiden Längsträger befinden, die seitlich über die Abdeckplatten ragen. Die X-Richtung zeigt in Fahrtrichtung FR1. Die Y-Richtung ist 90° horizontal zur X-Achse (in Blickrichtung der X-Achse nach rechts) gerichtet. Die Z-Richtung ergibt sich (nahezu) in Gravitationsrichtung (nach unten).

Der Nullpunkt der X-Achse liegt auf der Trennfläche zwischen den Blechen des Wagenkastens (CargoSprinter) und der gelben Frontschürze (CargoMover) in Fahrtrichtung FR1 (Abb. 130). Das fahrzeuginnere Frontblech des ursprünglichen CargoSprinter-Wagenkastens ist rot und das Frontblech, das beim Umbau zum CargoMover angebaut wurde, ist gelb/schwarz angestrichen. Die X-Achse ($y_{WK} = z_{WK} = 0 \text{ m}$) ist über die gesamte Wagenkastenlänge als die Längshalbierende der Wagenkastenbreite $L_{y,WK}$ definiert.

Der Nullpunkt der Y-Achse ist als die Abstandshalbierende des Frontbleches des CargoSprinters (rote Metallplatte) definiert, die Y-Achse selbst zeigt (Blickrichtung in Fahrtrichtung FR1) nach rechts (Abb. 131).

Der Nullpunkt der Z-Achse ergibt sich aus den Schnittpunkten der XZ-Ebene, YZ-Ebene und der XY-Ebene. Die Z-Richtung ergibt sich aus der Rechte-Hand-Regel (nach unten).

Die XY-Ebene beschreibt nun eine Fläche, die auf den Seitenflächen der Längsträger gelagert ist ($z_{WK} = 0 \text{ m}$). Die X-Koordinate ergibt sich aus der Messung zur Innenseite der CargoMover-Frontschürze. Die Y-Koordinate ergibt sich aus dem mittleren Abstand der Seitenflächen des oberen Blechs der Längsträger und dem Abstand zur zu messenden Koordinate. Die Z-Koordinate ergibt sich aus der Messung der oberen Fläche des Längsträgers zur Koordinate. Für Positionen unter dem Fahrzeug kann es sinnvoll sein, mit einem an den Unterseiten des linken und rechten Längsträgers gelagerten Richtscheites (oder von der Schienenoberkante) nach oben zu messen.

A.10.2 Wiegenträger-Koordinatensysteme (KS-WT1 / KS-WT2)

Zwischen den Drehgestellrahmen und dem Wagenkasten befinden sich die Sekundärfederstufe und ein Wiegenträger mit Drehkranz. In Abb. 132 sind die Schraubenfedern der Sekundärfederstufe zu sehen. Unterhalb der Sekundärfeder befindet sich der Drehgestellrahmen, oberhalb der Wiegenträger. Die Sekundärfeder wirkt translatorisch in Z-Richtung und gibt durch den beidseitigen Aufbau auch einen Rollwinkel (um die X-Achse) und einen Nickwinkel (um die Y-Achse) gefedert und gedämpft frei. Der Lenkwinkel um die Z-Achse wird vom Drehkranz zwischen Wiegenträger und Wagenkasten freigegeben.

Über seitliche Anschläge wird der Wiegenträger mit dem Drehgestellrahmen im Bogen mitgedreht. Das Spiel in den mechanischen Anschlägen wird hier vernachlässigt. Der Drehgestellrahmen und der Wiegenträger sind in vertikaler Richtung (Sekundärfederweg) voneinander entkoppelt. Der Wiegenträger ist am Drehkranz in einem Punkt im Wagenkasten-Koordinatensystem KS-WK um die Z-Achse drehbar mit dem Wagenkasten verbunden.

Es gibt für jedes Drehgestell je ein Wiegenträger. Die XY-Ebenen von Wiegenträger und Wagenkasten sind somit:

- in einem orthogonal zueinander stehenden festen Abstand
- zueinander parallel und
- um eine zu den Ebenen orthogonale Achse (Z-Achse des Wiegenträger-Koordinatensystems) zueinander drehbar.

Bei einem Drehwinkel zwischen dem Wiegenträger- und dem Wagenkasten-Koordinatensystem von 0° zeigen die Achsen des Wiegenträger-Koordinatensystems in die gleiche Richtung wie die des Wagenkasten-Koordinatensystems.

Der Koordinatenursprung des Wiegenträger-Koordinatensystems ist im Wagenkasten-Koordinatensystem mit folgenden Koordinaten definiert:

Wiegenträger am Drehgestell DG1:

X: -2.520 mm ; Y: 0 mm ; Z: 375 mm

Wiegenträger am Drehgestell DG2:

X: -16.470 mm ; Y: 0 mm ; Z: 375 mm

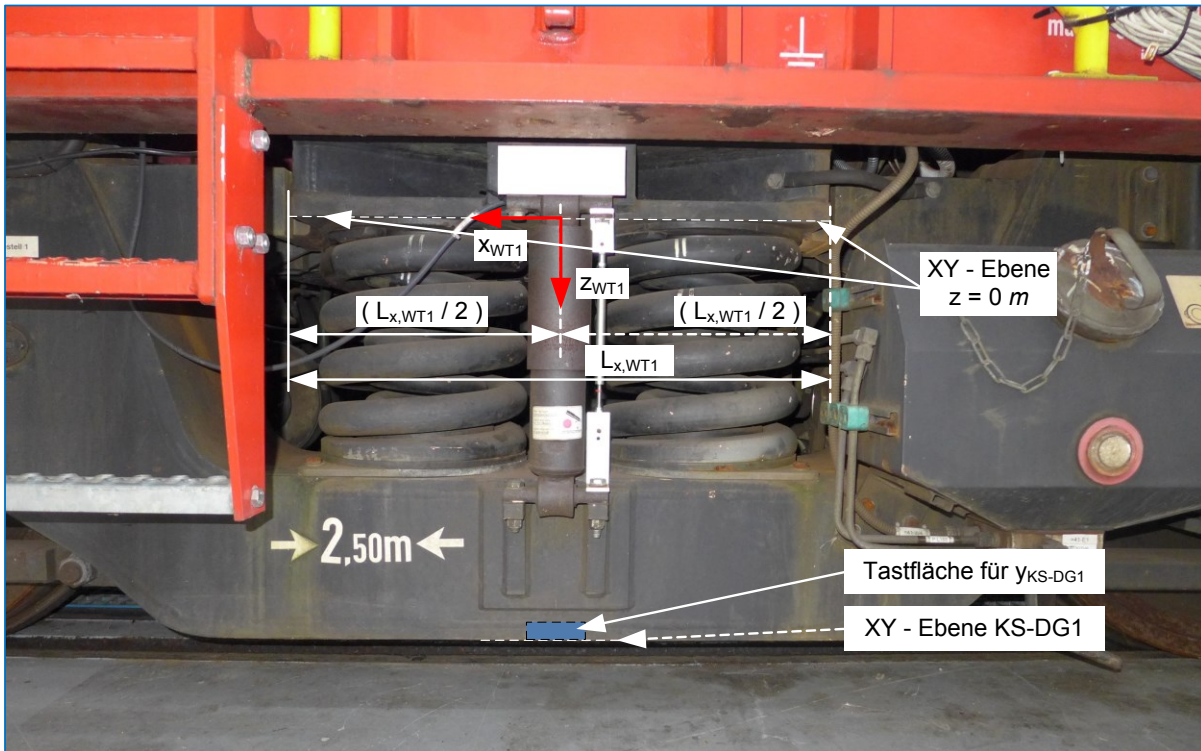


Abb. 132: Definition des Wiegenträger-Koordinatensystems am Drehgestell DG1 links

Die XY-Ebene ist am Fahrzeug durch die (seitlich sichtbare) untere Fläche des Wiegenträgers an der Außenkante definiert (siehe Abb. 132).

Die X-Achse und Y-Achse sind am Wagenkasten durch die Mitte des Drehkranzes bestimmt. Da der Drehkranz verbaut und nicht messbar ist, wird folgende messbare Definition gewählt:

Der Nullpunkt der X-Achse ist durch die Mitte der linken und rechten Seitenflächen des Wiegenträgers messbar.

Der Nullpunkt der Y-Achse ist als die halbe Distanz zwischen den seitlichen Stirnflächen des Wiegenträgers messbar.

Der Nullpunkt der Z-Achse fällt mit der unteren (seitlich messbaren) Fläche des Wiegenträgers zusammen, auf denen auch die Sekundärfedern aufliegen.

A.10.3 Drehgestell-Koordinatensysteme (KS-DG1 / KS-DG2)

Das Koordinatensystem des Drehgestells und das Koordinatensystem des Wiegenträgers hängen zusammen: In nicht verdrehter Lage ist das Drehgestell-Koordinatensystem genauso ausgerichtet wie das Wiegenträger-Koordinatensystem.

Die XY-Ebene des Drehgestell-Koordinatensystems bezieht sich auf die untere Ebene (die unter dem Fahrzeug sichtbare Fläche) der Doppel-T-Träger des Drehgestellrahmens (Abb. 133).

Die Nullpunkte der X-, Y- und Z-Achse beziehen sich auf den Durchstoßpunkt der Z-Achse des Wiegenträger-Koordinatensystems mit der XY-Ebene des Drehgestell-Koordinatensystems, wenn die Achsen beider Koordinatensysteme parallel zueinander stehen.

Die Drehgestell-Mittelebene (XZ-Ebene, $Y = 0 \text{ m}$) wird indirekt ermittelt, indem man den halben Abstand zwischen den nach außen zeigenden vertikalen Flächen des Drehgestellrahmens mittig unterhalb des Sekundärdämpfers an der unteren Kante misst (Abb. 132).

Der Ursprung des Drehgestell-Koordinatensystems ist im Wiegenträger-Koordinatensystem folgendermaßen definiert:

Drehgestell DG1 am Wiegenträger WT1:

X: 0 mm ; Y: 0 mm ; Z: 585 mm

Drehgestell DG2 am Wiegenträger WT2:

X: 0 mm ; Y: 0 mm ; Z: 585 mm

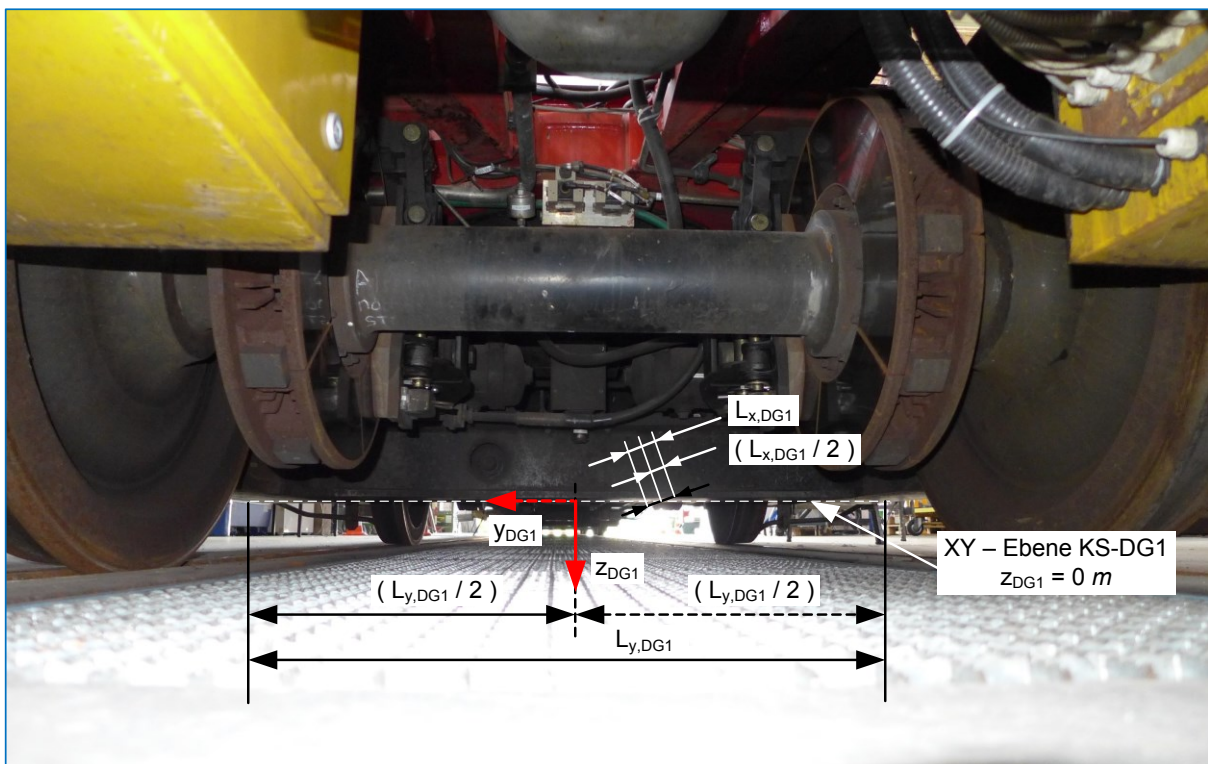


Abb. 133: Definition des KS-DG1 Koordinatensystems, Fahrzeugspitze in Fahrtrichtung FR1, unter dem Frontblech in Fahrtrichtung FR2 fotografiert

Durch die Sekundärfederung auf der linken und rechten Fahrzeugseite sind das Wiegenträger- und das Drehgestell-Koordinatensystem bei einer gleichmäßigen Einfederung der Sekundärfeder vertikal parallel zueinander verschoben. Bei ungleichmäßiger Einfederung tritt eine Drehung um die X-Achse des Drehgestell-

koordinatensystems (Rollbewegung) auf. Die vertikale Verschiebung ist als die Verschiebung des Drehgestell-Koordinatensystem-Ursprungs auf der Z-Achse des Wiegenträger-Koordinatensystems definiert. Die Drehung wird als eine Drehung um die X-Achse des Drehgestell-Koordinatensystems definiert.

Am Fahrzeug wird das Spiel an den Gleitlagern zwischen Drehgestellrahmen und Wiegenträger nicht gemessen und wird daher hier vernachlässigt.

A.10.4 Koordinatensystem-Beziehung zum Fahrweg

Die mechanische Verbindung zwischen den Schienen des Fahrweges und den Rädern des Fahrzeuges bildet der Rad-Schiene Kontakt. Die Räder sind zu Radsätzen verbunden, die über Radlager und Primärfedern an den Drehgestellrahmen gebunden sind. An dieser Stelle sollen die realen Eigenschaften nicht gemessener Funktions- und Störgrößen vereinfacht werden.

Die Fahrwegdefinition wird in Abschnitt 2.5.6 eingeführt. Auf einem geraden, nicht überhöhten Gleis ohne Steigung hat die Fläche auf Schienenkopfhöhe einen vertikalen Abstand von rund 170 mm zur XY-Fläche des Drehgestell-Koordinatensystems. Da die Koordinatensysteme vom Wagenkasten über den Wiegenträger und das Drehgestell definiert wurden, sind die sich durch Toleranzen und Verschleiß ergebenden Abweichungen in der lateralen und vertikalen Lage zwischen Drehgestell-Koordinatensystem und Gleisachse des Fahrweges definiert. Der idealisierte Verbindungspunkt von Drehgestell und Fahrweg auf der Gleisachse wird im Drehgestell-Koordinatensystem folgendermaßen angegeben:

Drehgestell DG1:

X: 0 mm ; Y: 0 mm ; Z: 170 mm

Drehgestell DG2 am Wiegenträger WT2:

X: 0 mm ; Y: 0 mm ; Z: 170 mm

Das Drehgestellkoordinatensystem bewegt sich parallel zur Fläche auf Schienenkopfhöhe (am Durchstoßpunkt der Z-Achse des Drehgestellkoordinatensystems mit der Fläche auf Schienenkopfhöhe).

A.10.5 Vollständiges geometrisches Modell mit Radsatz-Koordinatensystem

Aus dem Drehgestell-Koordinatensystem wird für jeden Radsatz ein sich in der Symmetrieachse des Radsatzes befindendes, nicht umlaufendes Radsatz-Koordinatensystem definiert. Dies wird durch eine Verschiebung des Drehgestell-Koordinatensystems in X- und Z-Richtung in die Drehachse definiert. Durch die

Primärfederung kann sich das Radsatz-Koordinatensystem in alle Raumrichtung des Drehgestell-Koordinatensystems verschieben und um die Z- und X-Achse verdrehen.

Es wird definiert, dass sich das Radsatz-Koordinatensystem in einem festen Abstand über der Gleisachse befindet. Dieser Abstand wird durch den Radradius in Abhängigkeit vom Radwinkel und dem Berührungspunkt auf dem (Rad-)Lauffläche definiert.

A.10.6 Vereinfachtes geometrisches Modell ohne Radsatz

Die Drehgestell-Geometrie wird vereinfacht, sodass die Z-Achse des Drehgestell-Koordinatensystems in einem festen Abstand (in Z-Richtung) von 170 *mm* orthogonal auf die Gleisachse fällt.

A.11 Definition der Sensorpositionen

In diesem Abschnitt werden die Positionen der bereits in Anhang A vorgestellten Fahrzeugsensoren beschrieben. Die Benennung der Sensoren ist in Anhang A und den Kapiteln 5, 6 und 7 konsistent gehalten, sodass die hier gezeigten und definierten Sensorpositionen auch für die in der Simulationsumgebung gezeigten Sensoren gelten. Die Sensorpositionen werden in den Abbildungen teilweise mit einem eigenen Koordinatensystem dargestellt. Die Ausrichtung des Koordinatensystems entspricht der messtechnischen Ausrichtung des Sensors auf dem Versuchsfahrzeug und des Markers im Modell der Mehrkörpersimulation. Ist kein Koordinatensystem angegeben, entspricht die Ausrichtung des Markers in der Mehrkörpersimulation der Ausrichtung des Koordinatensystems, in dem die Position definiert ist.

A.11.1 GNSS-Antennenpositionen

An den Fahrzeugspitzen und auf dem Bürocontainer des IFS-Erprobungsträgers sind vier GNSS-Antennen angebracht.

Die Position der Antennen im Wagenkasten-Koordinatensystem beschreibt den mittleren Punkt unter dem Kunststoffgehäuse der GNSS-Antennen (mittlerer Punkt in der Schraubverbindung). Der Positionsunterschied zwischen diesem Punkt und dem virtuellen Punkt (Phasenzentrum) innerhalb der Antenne, auf denen sich die empfangenen Messdaten beziehen, ist den Datenblättern der Sensoren zu entnehmen. In der Mehrkörpersimulation beziehen sich die Marker der Antennen immer auf das Phasenzentrum.

An den Spitzen des Fahrzeuges sind Einfrequenz-GNSS-Sensoren von uBlox mit der serienmäßigen Patchantenne verbaut. Deren Antennenpositionen im Wagenkasten-Koordinatensystem sind:

Fahrzeugspitze in FR1 für uBlox EVK 6T (GNSS-FR1)

X: -8 mm ; Y: 0 mm ; Z: -1.900 mm

Fahrzeugspitze in FR2 für uBlox EVK 5T (GNSS-FR2)

X: -18.965 mm ; Y: 0 mm ; Z: -2375 mm

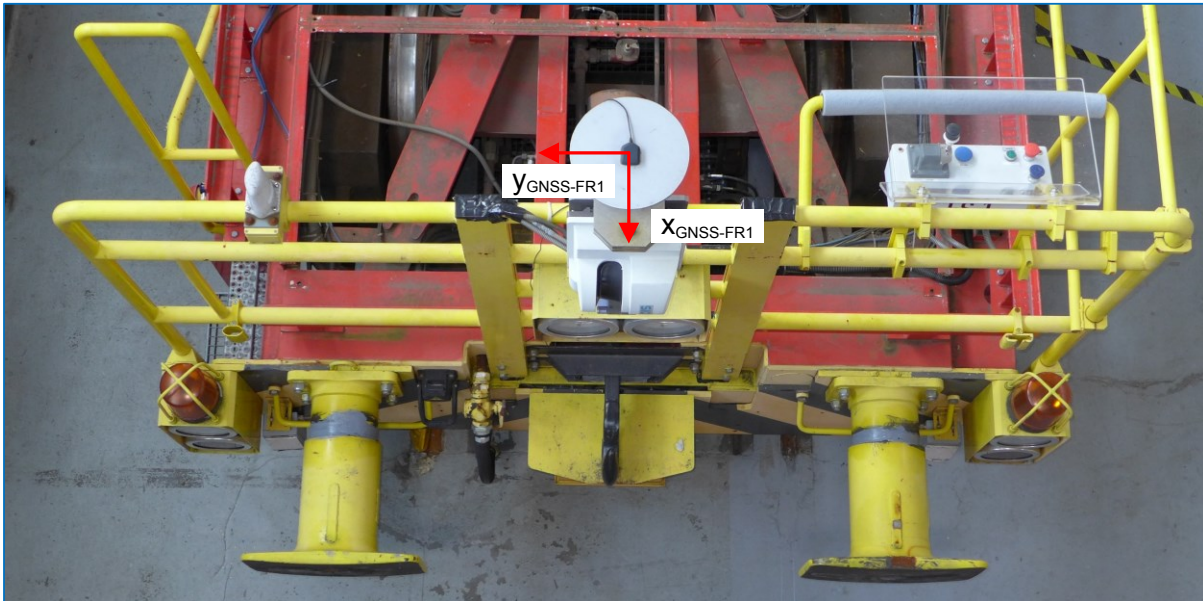


Abb. 134: GNSS-FR1 Sensor an der Fahrzeugspitze in Fahrtrichtung FR1

Abb. 134 zeigt die Einbausituation der GNSS-FR1 Sensorantenne und Abb. 135 die Einbausituation der GNSS-FR2 Sensorantenne. Die Sensorposition bezieht sich in vertikaler Richtung auf die Oberfläche der Aluminiumplatte (zur Abschirmung von Reflexionen). Die X- und Y-Koordinaten beziehen sich auf die geometrische Mitte des Antennengehäuses.

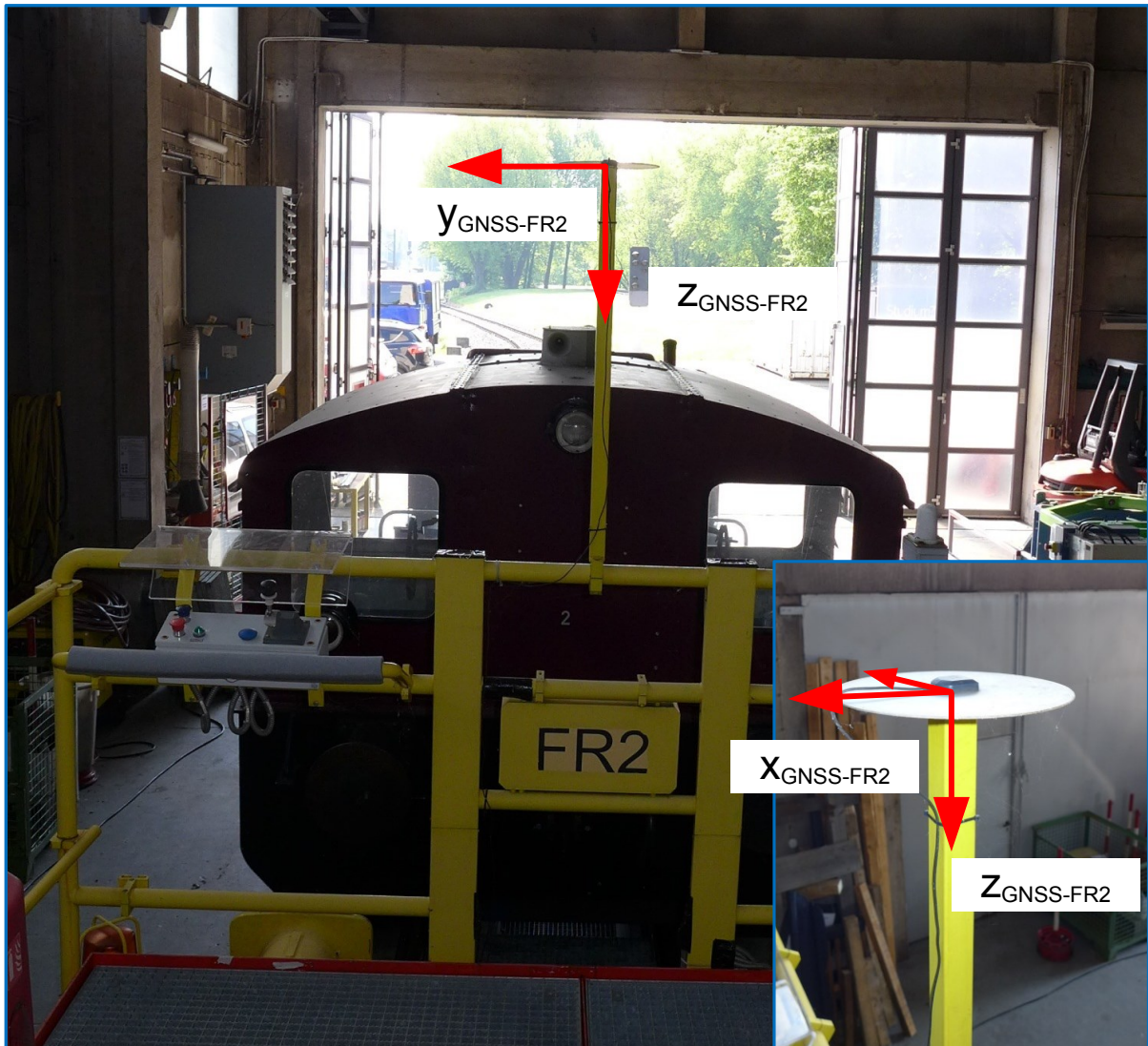


Abb. 135: GNSS-FR2 Sensor an der Fahrzeugspitze in Fahrtrichtung FR2

Auf dem Bürocontainer sind in beide Fahrtrichtungen an Bosch-Profilen Zweifrequenz-Antennen angebracht. Die Konfiguration am Bürocontainer in Fahrtrichtung FR1 ist in Abb. 136 dargestellt. Die Konfiguration in Fahrtrichtung FR2 wurde bereits in Abb. 127 gezeigt.

Die mittleren Positionen am unteren Anschraubpunkt der Antennen im Wagenkasten-Koordinatensystem (KS-WK) sind:

Container FR1 (GNSS-5): Novatel GPS-70x-xx für railGATE-Empfänger

X: -6.308 mm ; Y: 0 mm ; Z: -3.080 mm

Container FR2 (GNSS-3/GNSS-4) : navXperience 3G+C

- GNSS-3 für Empfänger Leica Viva GS10
- GNSS-4 für Empfänger Septentrio AsteRx3 HDC

X: -12.090 mm ; Y: 9 mm ; Z: -3.078 mm

Auf dem Antennengehäuse ist ein Richtungspfeil angegeben. Abhängig vom Antennenaufbau befindet sich das Phasenzentrum innerhalb des Antennengehäuses. Die Position des Phasenzentrums im Wagenkasten-Koordinatensystem ist:

Container FR1 (GNSS-5): Novatel GPS-70x-xx für railGATE-Empfänger

X: -6.308 mm ; Y: 0 mm ; Z: -3.140 mm

Der Höhenunterschied zwischen der „antenna reference plane“ (ARP) zum „phase center“ ist im Datenblatt auf <http://www.novatel.com/support/info/documents/1335> oder <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/Antennas.jsp?manu=NovAtel> dokumentiert. Es wird ein Höhenunterschied von 60 mm angenommen.

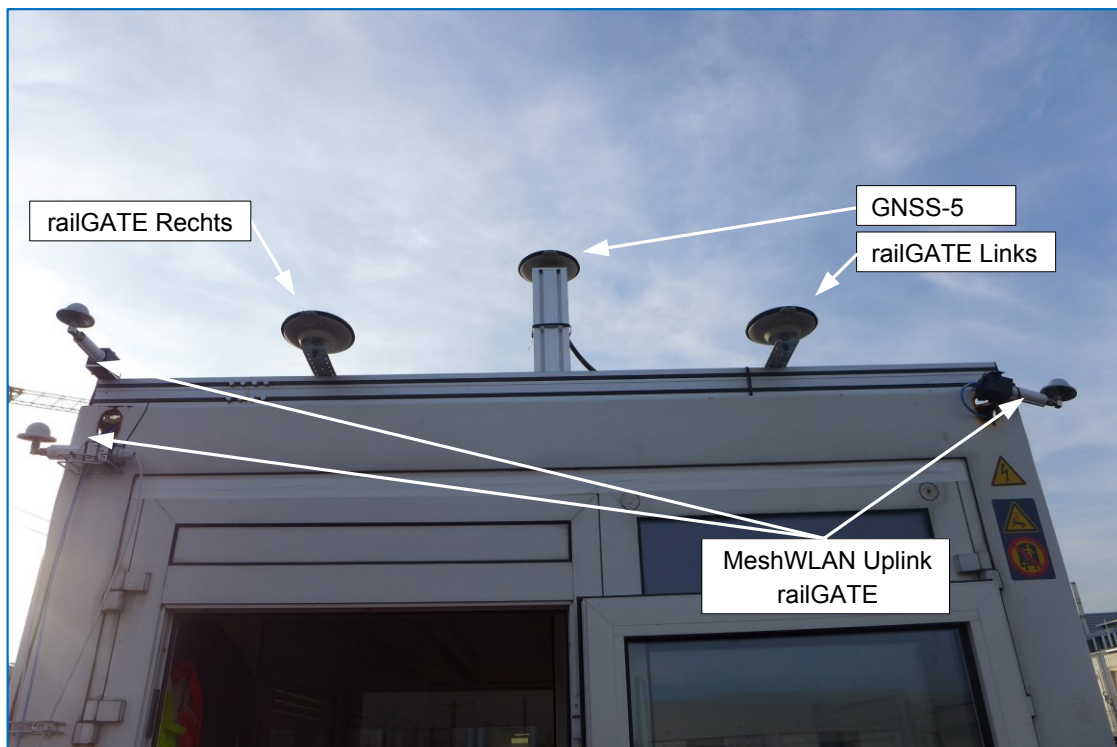


Abb. 136: Antennen am Bürocontainer in Fahrtrichtung FR1 (in Blickrichtung FR2)

Zur Aufnahme von Testdaten von railGATE-Empfängern wurden zwei weitere GNSS-Antennen auf dem Bosch-Profil des Containerdaches in Fahrtrichtung FR1 montiert. Es wird ein geschätzter Höhenunterschied vom ARP zum Phasenzentrum von 60 mm angenommen.

Die Koordinaten des Phasenzentrums im Wagenkasten-Koordinatensystem sind:

Containerdach FR1 railGATE-Links Antenne: Novatel GPS-70x-xx

X: -6.078 mm ; Y: -594 mm ; Z: -2.804 mm

Containerdach FR1 railGATE-Rechts Antenne: Novatel GPS-70x-xx

X: -6.078 mm ; Y: 594 mm ; Z: -2.804 mm

A.11.2 Inertialsensor / IMU

Diese IMU (Microstrain 3DM-GX3-25) ist ein dreidimensionaler Beschleunigungs- und Drehratensensor, der sich in einem Schutzgehäuse (siehe Abb. 127) befindet. Der Sensor hat eine hohe Empfindlichkeit und mit 100 Hz eine eher geringe Abtast-rate. Er wird für die niederfrequente Positions- und Lageänderung des Wagenkastens genutzt. Das Sensorgehäuse ist wasserdicht verbaut. Um unerwünschte hochfrequente mechanische Fahrzeugschwingungen (hauptsächlich durch die Dieselmotoren) zu minimieren, wurde das Sensorschutzgehäuse zusätzlich in ein mit Schaumstoff gefülltes Vibrationsschutzgehäuse verpackt.

Zur Vereinfachung wird hier die Mitte des Vibrationsschutzgehäuses im Wagenkasten-Koordinatensystem angegeben:

$$X: -12.173 \text{ mm} ; Y: -146 \text{ mm} ; Z: -2.775 \text{ mm}$$

Die Ausrichtung der drei Sensorachsen zum Wagenkasten-Koordinatensystem wird aus Messdaten bei einer Beschleunigungsfahrt auf einer geraden Gleisabschnittes und der Erdbeschleunigung im Stillstand ermittelt.

$$\text{Ausrichtung: } X_{\text{KS-WK}}: X_{\text{KS-IMU}} ; Y_{\text{KS-WK}}: -Y_{\text{KS-IMU}} ; Z_{\text{KS-WK}}: -Z_{\text{KS-IMU}}$$

Die exakte Winkellage des IMU-Sensors zum Wagenkasten-Koordinatensystem ist vor einer Messfahrt neu zu bestimmen.

A.11.3 Inertialsensor/IMU im Drehgestellrahmen des Drehgestells DG1

Der Sensor Analog Devices ADIS16375 ist in einem Schutzgehäuse nahe der Mitte des Drehgestellrahmens von Drehgestell DG1 angebracht. Die Position des Sensorelementes innerhalb des Sensorgehäuses wurde anhand des Datenblattes ermittelt. Die Position des Sensorgehäuses innerhalb des Schutzgehäuses sowie die Position des Schutzgehäuses im Drehgestellrahmen wurden vermessen. Die angegebene Position beschreibt die Position und Lage des Sensorelementes im Drehgestell-Koordinatensystem (KS-DG1):

$$X: -105 \text{ mm} ; Y: -10 \text{ mm} ; Z: -155 \text{ mm}$$

$$\text{Ausrichtung: } X_{\text{KS-WK}}: -X_{\text{KS-IMU_DG1}} ; Y_{\text{KS-WK}}: -Y_{\text{KS-IMU_DG1}} ; Z_{\text{KS-WK}}: Z_{\text{KS-IMU_DG1}}$$

Die exakte Winkellage des IMU-Sensors zum Wagenkasten-Koordinatensystem ist vor einer Messfahrt neu zu bestimmen.

A.11.4 2D-Beschleunigung auf dem Wagenkasten über dem Drehgestell DG1

Die experimentelle Versuchsanordnung besteht aus zwei orthogonal zueinander messenden analogen Beschleunigungssensoren (PCB 3741B122G) mit einer am IFS entwickelten Verstärkerelektronik. Die Sensoren haben einen Messbereich von $\pm 2g \approx \pm 20 \text{ m/s}^2$. Die Signale nimmt das RCP-System auf. Diese Anordnung soll hier nur zur Vollständigkeit erwähnt werden, weil sie in der Simulationsumgebung nicht als Sensormodell implementiert ist. Die zwei Sensor-Messrichtungen sind als Sensor-X- und Sensor-Y-Richtung definiert.

Position im Wagenkasten-Koordinatensystem (KS-WK):

X: -2.525 mm ; Y: 0 mm ; Z: -250 mm

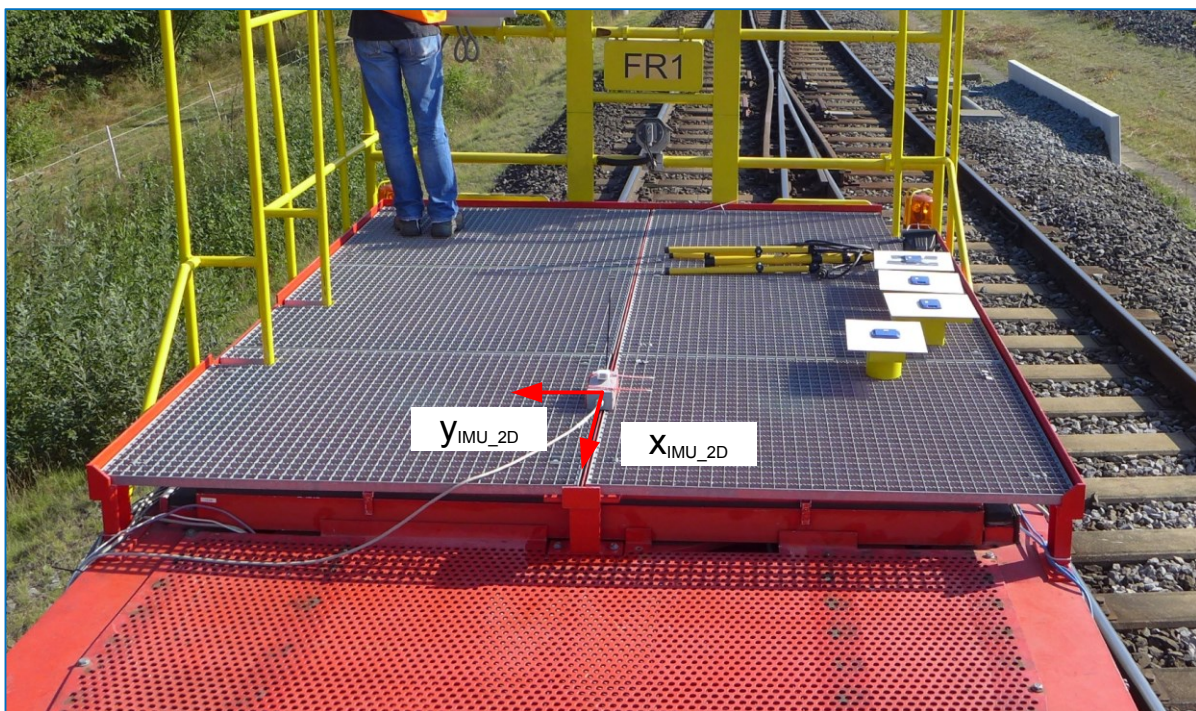


Abb. 137: Einbausituation des IMU-2D Sensors

Das Sensorgehäuse war mit Kabelbindern befestigt. Die Grobausrichtung der Sensoren war um 180° auf der XY-Ebene des Wagenkasten-Koordinatensystems gedreht. So waren die X-Achse des Sensors ungefähr entgegen der X-Achse und die Y-Achse des Sensors ungefähr entgegen der Y-Achse des Wagenkasten-Koordinatensystems (KS-WK) ausgerichtet. In einer ersten Annäherung kann man von einer parallelen Anordnung ausgehen. Eine Schätzung des Winkels zwischen Sensor- und Wagenkasten-Koordinatensystem ist anhand von Messdaten in eindeutigen Messsituationen möglich.

A.11.5 RFID-Sensorik

Das RFID-System hat drei mögliche Antennenpositionen unter dem Fahrzeug, um RFID-Tags im Gleisbett auszulesen. Hinter den Frontblechen der beiden Fahrzeugsitzen befindet sich je eine Antenne. In frühen Experimenten war eine dritte, sehr große RFID-Antenne zwischen Drehgestell DG2 und Mitte des Fahrzeuges angebracht. Die Positionen der RFID-Antennen (Abb. 138) an den Spitzen des Fahrzeuges beziehen sich auf die geometrische Mitte der Antenne in der XY-Ebene und auf die untere Fläche der Plexiglasplatte des Schutzgehäuses in Z-Richtung.

RFID-Antenne hinter dem Frontblech in Fahrtrichtung FR1 im Wagenkasten-Koordinatensystem (KS-WK):

$X: -175 \text{ mm} ; Y: 0 \text{ mm} ; Z: 940 \text{ mm}$

RFID-Antenne hinter dem Frontblech in Fahrtrichtung FR2 im Wagenkasten-Koordinatensystem (KS-WK):

$X: -18.815 \text{ mm} ; Y: -85 \text{ mm} ; z: 777 \text{ mm}$

Die Anschraubpunkte an den Seiten der Antenne sind parallel zur Y-Richtung angeordnet, das Antennenelement steht also quer zur Fahrtrichtung.

Die große Antenne ist für die Experimente dieser Arbeit nicht mehr verbaut, daher kann hier keine Position angegeben werden.

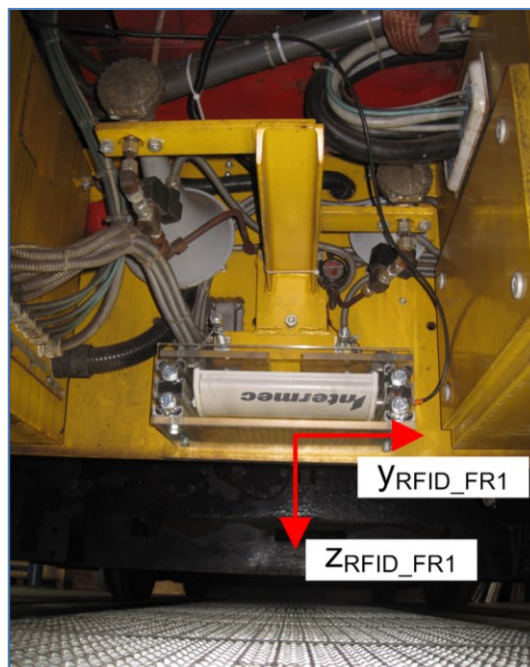


Abb. 138: RFID-Antenne hinter dem Frontblech in Fahrtrichtung FR1

Abb. 138 zeigt die Einbausituation der RFID-Antenne in Fahrtrichtung FR1. Die RFID-Antenne ist an das im Hintergrund sichtbare CargoMover-Frontblech angebracht. Der gelbe Kasten auf der linken Seite ist der Messtechnikkasten (+117),

der bereits in Abb. 123 gezeigt wird. Auf der rechten Seite befindet sich der Kasten des Steuergerätes Siemens ZUB262. Des Weiteren sind zwei Signalhörner mit deren pneumatischer Ansteuerung abgebildet.

A.11.6 Vertikaler Abstandslaser

Dieser Abstandslaser (Baumer OADM 20I6592, Abb. 139) misst die Distanz (z_{Laser}) zwischen dem Sensorgehäuse und dem Gleisbett. Er befindet sich unter dem Wagenkasten. Dadurch können sich im Gleis befindende Objekte, z. B. Wegmarken, Weichen und Schwellen, aufgrund ihres Höhenunterschiedes bei einer Vorbeifahrt vermessen werden. Die angegebene Position im Wagenkasten-Koordinatensystem bezieht sich auf den Punkt, an dem der Laserstrahl das Sensorgehäuse verlässt.

Position im Wagenkasten-Koordinatensystem (KS-WK):

X: -13.620 mm ; Y: 20 mm ; Z: 885 mm

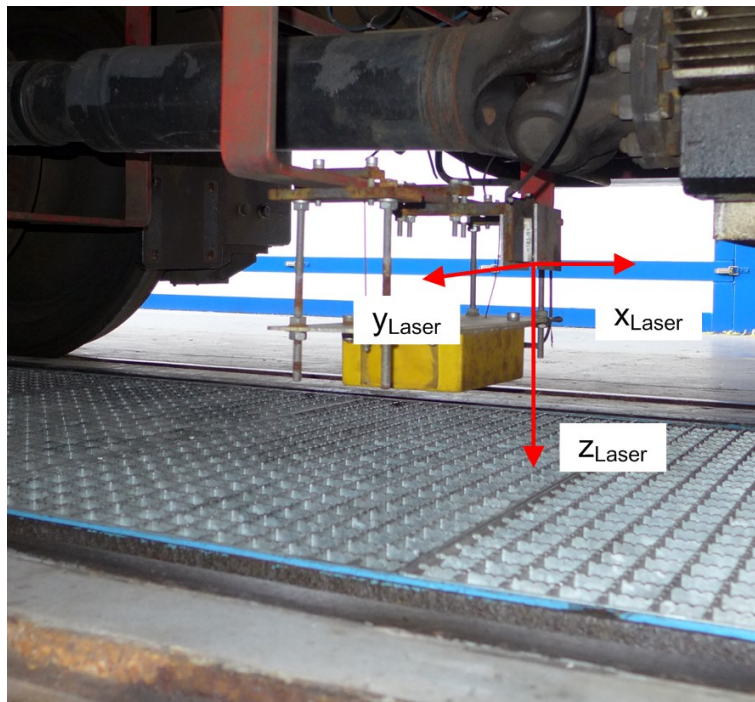


Abb. 139: Position des vertikalen Abstandslasers

A.11.7 Induktiver Abstandssensor

Dieser Sensor (Proxitron MKU 215.19 S4, Abb. 140) kann ferromagnetische Elemente in Umfeld des Sensors durch einen Intensitätsauschlag erkennen. Die angegebene Position bezieht sich auf die geometrische Mitte des gelben Sensorgehäuses in der XY-Ebene und auf die halbe Höhe des gelben Gehäuses.

Position im Wagenkasten-Koordinatensystem (KS-WK):

X: -13.745 mm ; Y: 0 mm ; Z: 990 mm

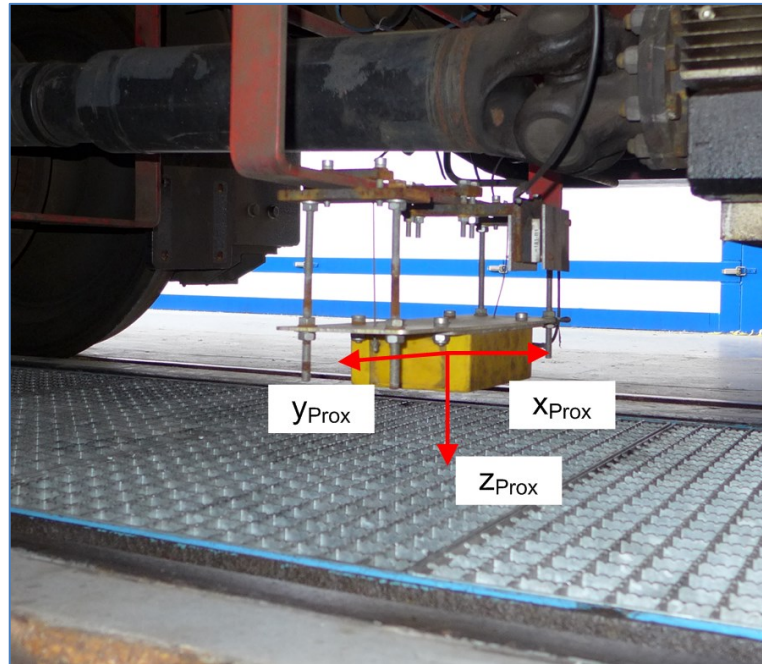


Abb. 140: Position des induktiven Abstandssensors Proxitron

A.11.8 Doppler-Radar in beide Fahrtrichtungen

Die zwei Doppler-Radare (Deuta DRS05) sind unter dem Wagenkasten montiert (Abb. 141). Die hier angegebene Position bezieht sich in der

- YZ-Ebene auf die Rückseite der Sensoren, mit der sie aneinander stehen
- XY-Ebene auf die Mitte der Sensoren
- XZ-Ebene auf die Ebene, mit der sie an die Adapterplatte geschraubt sind

Position beider Sensoren im Wagenkasten-Koordinatensystem (KS-WK):

X: -8.790 mm ; Y: -630 mm ; Z: 920 mm

Doppler-Radar 1 zeigt parallel in Richtung der X-Achse (Fahrtrichtung FR1)

Doppler-Radar 2 zeigt parallel entgegen der Richtung der X-Achse (Fahrtrichtung FR2)

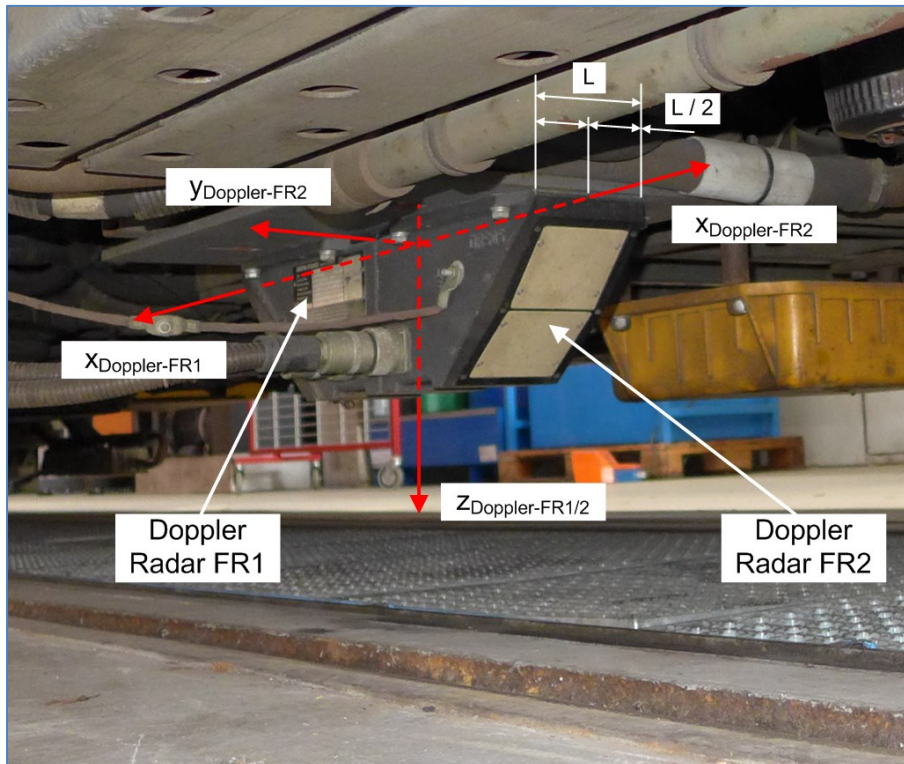


Abb. 141: Definition der Doppler Radare

Die Sensoren strahlen mit zwei Sensorelementen in unterschiedlichem Winkel in das Gleisbett und messen aus der reflektierten Radarstrahlung nach dem Doppler-Effekt die Geschwindigkeit. Daher weichen der Messpunkt der Sensoren im Gleisbett und die Position am Wagenkasten voneinander ab.

A.11.9 Geschwindigkeitssensor CorrRail Correvit Rail 200

Der Geschwindigkeitssensor ist am Drehgestell DG1 montiert und kann über ein optisches Messverfahren die eindimensionale Relativgeschwindigkeit zu einer Fläche (hier der Schienenkopf) messen (Abb. 142). Die angegebene Position des Sensors bezieht sich auf die Symmetrieachse des Sensorrohres und auf die Höhe der unteren Öffnung des Sensorrohres.

Position im Drehgestell-Koordinatensystem KS-DG1

X : -1.860 mm ; Y : 1.060 mm ; Z : 25 mm

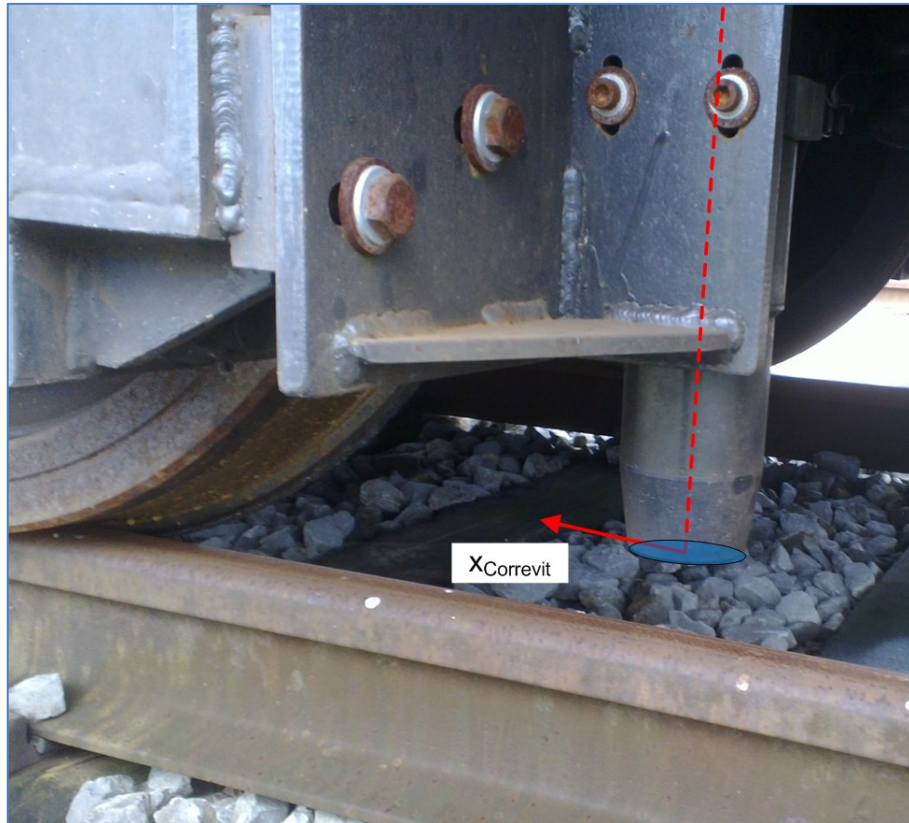


Abb. 142: Correvit-Sensor

A.11.10 Geschwindigkeitssensoren: Mitlaufende Räder

Die Position des mitlaufenden Rades (Abb. 120) bezieht sich auf den Radmittelpunkt des Sensorrades. Die Messräder haben einen Raddurchmesser von 280 mm.

Position des linken mitlaufenden Rades im Drehgestell-Koordinatensystem KS-DG2:

X: 2.060 mm ; Y: 765 mm ; Z: 10 mm

Position des rechten mitlaufenden Rades im Drehgestell-Koordinatensystem KS-DG2:

X: 2.070 mm ; Y: -770 mm ; Z: 10 mm

A.11.11 Drehgestell-Ausdrehwinkel

Der Drehgestell-Ausdrehwinkel ist definiert als der Winkel um die Z-Achse zwischen dem Wagenkasten und dem Drehgestell. Theoretisch sollte (bis auf Spiel in den Gleitlagerung) zwischen Wiegenträger und Drehgestell keine Relativedrehung um die Z-Achse stattfinden. In einer praktischen Messanordnung ist dieser Winkel schwer zu messen. So wurden durch eine Triangulation von zwei Abstandssensoren am Wagenkasten der Abstand zu zwei definierten Seitenflächen des Drehgestellrahmens der

Drehgestell-Ausdrehwinkel und der seitliche Versatz des Drehgestellrahmens (in Y-Richtung des Wagenkasten-Koordinatensystems KS-WK) bestimmt.

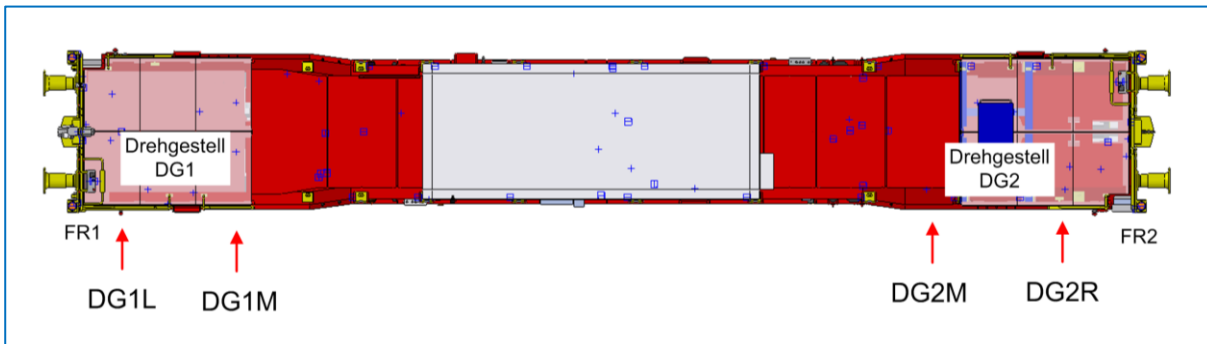


Abb. 143: Lage der vier Drehgestell-Ausdrehwinkel-Messstellen

Im mittigen und nicht ausgedrehten Zustand der Drehgestelle lassen sich die Ausgangspositionen angeben. So wird im Wagenkasten-Koordinatensystem der Austrittspunkt des Laserstrahles aus dem Sensorgehäuse angegeben, der als Distanz 0 mm definiert ist. Der Laserstrahl ist als parallel und in Gegenrichtung zur Y-Achse des Wagenkasten-Koordinatensystems definiert. Der Laserpunkt am Drehgestellrahmen wird im Wagenkasten-Koordinatensystem KS-WK und im Drehgestell-Koordinatensystem angegeben.

Tabelle 9: Positionen der Drehgestell-Ausdrehwinkelsensorik

Name	Austrittspunkt KS-WK			Laserpunkt KS-WK			Laserpunkt KS-DG 1/2		
Drehgestell DG1:							KS-DG1		
DG1L	X:	−925	mm	X:	−925	mm	X:	1595	mm
	Y:	−1215	mm	Y:	−1055	mm	Y:	−1055	mm
	Z:	327	mm	Z:	327	mm	Z:	−633	mm
DG1M	X:	−3930	mm	X:	−3930	mm	X:	1410	mm
	Y:	−1215	mm	Y:	−1055	mm	Y:	−1055	mm
	Z:	327	mm	Z:	327	mm	Z:	−633	mm
Drehgestell DG2:							KS-DG2		
DG2M	X:	−15110	mm	X:	−15110	mm	X:	1360	mm
	Y:	−1230	mm	Y:	−1090	mm	Y:	−1090	mm
	Z:	327	mm	Z:	327	mm	Z:	−633	mm

DG2R		X:	-18060	mm		X:	-18060	mm		X:	-1590	mm
		Y:	-1215	mm		Y:	-1070	mm		Y:	-1070	mm
		Z:	327	mm		Z:	327	mm		Z:	-633	mm

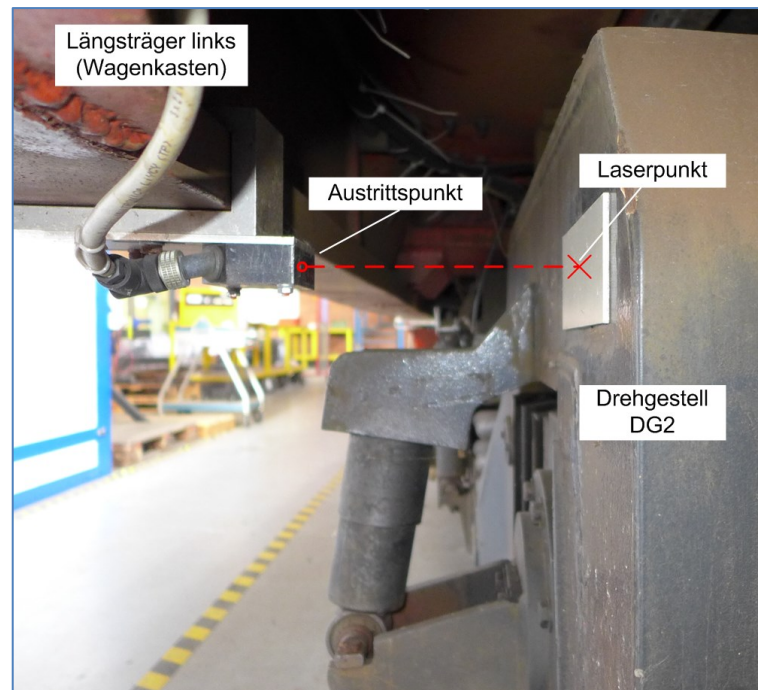


Abb. 144: Drehgestell-Ausdrehwinkelsensorik an der Messstelle DG2R

A.11.12 Sekundärfederweg

Parallel zu den Sekundärfedern wurden induktive (LVDT) Abstandssensoren TWK IW120/40 eingebaut. Die Sekundärfedern übertragen die Gewichtskraft des Wagenkastens vom Wiegenträger aus auf den Drehgestellrahmen und halten den Abstand zwischen den Bauteilen. Somit sind die Anschraubpunkte des Sekundärfederweg-Sensors auf der einen Seite an den Wiegenträger und damit an das Wiegenträger-Koordinatensystem gekoppelt und auf der anderen Seite an das Drehgestell mit dem Drehgestell-Koordinatensystem. Aus der Position der Anschraubpunkte, der Sensorgeometrie und dem Sensorsignal können der vertikale Abstand und der Winkel um die X-Achse zwischen dem Wiegenträger- und dem Drehgestell-Koordinatensystem bestimmt werden.

Der Abstand eines Sensors zwischen den zwei Anschraubpunkten bei einem Sensorsignal von 0 mm beträgt 250 mm. Der Anschraubpunkt des Sensors ist definiert als die Mitte der Kugel des Kugelgelenkes.

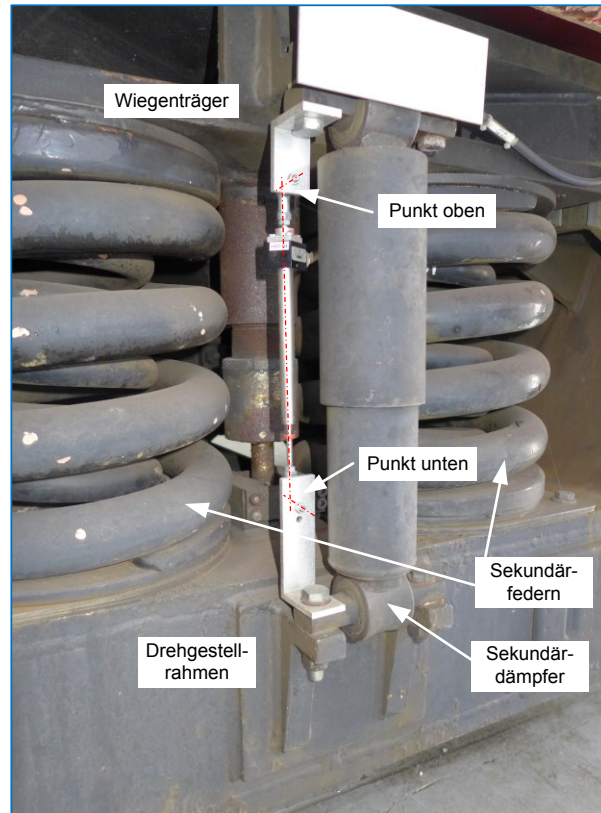


Abb. 145: Messanordnung Sekundärfederweg

Drehgestell FR1, linke Seite, Punkt oben, Wiegenträger-Koordinatensystem:

X: -55 mm ; Y: -1.130 mm ; Z: 440 mm

Drehgestell FR1, linke Seite, Punkt unten, Drehgestell-Koordinatensystem:

X: -55 mm ; Y: -1.130 mm ; Z: -395 mm

Drehgestell FR1, rechte Seite, Punkt oben, Wiegenträger-Koordinatensystem:

X: -55 mm ; Y: 1.130 mm ; Z: 440 mm

Drehgestell FR1, rechte Seite, Punkt unten, Drehgestell-Koordinatensystem:

X: -55 mm ; Y: 1.130 mm ; Z: -395 mm

Drehgestell FR2, linke Seite, Punkt oben, Wiegenträger-Koordinatensystem:

X: 55 mm ; Y: -1.130 mm ; Z: 440 mm

Drehgestell FR2, linke Seite, Punkt unten, Drehgestell-Koordinatensystem:

X: 55 mm ; Y: -1.130 mm ; Z: -395 mm

Drehgestell FR2, rechte Seite, Punkt oben, Wiegenträger-Koordinatensystem:

X: 55 mm ; Y: 1.130 mm ; Z: 440 mm

Drehgestell FR2, rechte Seite, Punkt unten, Drehgestell-Koordinatensystem:

X: 55 mm ; Y: 1.130 mm ; Z: -395 mm

B Details der Konfiguration zu den Ergebniskapiteln Kapitel 6 und Kapitel 7

B.1 Simulationscomputer

Zur Einordnung der Simulationsergebnisse sind hier die technischen Daten des verwendeten Computers und der verwendeten Software abgelegt. Anschließend wird die Leistungsfähigkeit des Systems durch einen Benchmark eingeordnet.

Modell:	Dell Optiplex 990MT
Prozessor:	Intel Core i7-2600 CPU @ 3,40 GHz
CPU-Core:	4 Cores, 8 Threads
Arbeitsspeicher:	16 GB DDR3 @ 667MHz (4× 4096 MB)
Betriebssystem:	Windows 7 Enterprise, Service Pack 1, 64 Bit
Festplatte (Daten):	120 GB SSD
MATLAB-Version:	8.2.0.701 (R2013b, 64 Bit)
SIMPACT-Version:	9.8.2 (64 Bit)
Python-Version:	2.7.3 (32 Bit)

Im Testprogramm CINEBENCH R15 erreicht dieser Computer im Bereich CPU eine Punktzahl von 613 Punkten.

B.2 Fahrplandefinition zur Referenzmessfahrt vom 31.10.2014

In Kapitel 6 wird eine Messfahrt in der Simulationsumgebung beschrieben, in der das Schienenfahrzeug einmal den Testring T1 des PCWs umrundet.

Der Streckenatlas-Server erzeugt hierfür vor der Simulation aus einer Gleisnetzdefinition und einem Fahrplan die zu befahrende Streckendefinition. In dem Fahrplan sind die zu befahrenden Gleise der Gleisnetzdefinition und die Bewegungsrichtung in aufsteigender oder absteigender Kilometrierung („km Richtung“) beschreiben. Der Startpunkt der Simulation wird durch die Primitive und die lokale Distanz auf der Primitive festgelegt. Die Bewegungsrichtung ergibt sich aus dem weiteren Fahrplan. Die Fahrtrichtung-Ausrichtung des Schienenfahrzeuges am Startpunkt wird im SIMPACK-Modell durch den Benutzer festgelegt. Die nachfolgende Tabelle 10 dokumentiert die in der railML-Datei verwendeten Fahrplan-Informationen.

Startpunkt: Primitive „T1_Gleis_110_Bogen_1“, s = 521,090 m, km = 521,090 m

Tabelle 10: Fahrplaninformation der Testfahrt aus Abschnitt 6.1

Gleis	Primitive	Geometrie	km Richtung
T1_Gleis_110	Bogen_1	Bogen	abwärts
T1_W1041	Aussen_Bogen	Bogen	abwärts
T1_Gleis_140	Bogen_2	Bogen	abwärts
T1_Gleis_140	Bogen_1	Bogen	abwärts
T1_Gleis_140	Klothoide_1	Klothoide	abwärts
T1_Gleis_130	Gerade_3	Gerade	abwärts
T1_Gleis_130	Gerade_2	Gerade	abwärts
T1_Gleis_130	Klothoide_1	Klothoide	abwärts
T1_Gleis_130	Bogen_2	Bogen	abwärts
T1_Gleis_130	Bogen_1	Bogen	abwärts
T1_W1212	Aussen_Bogen	Bogen	abwärts
T1_Gleis_120	Bogen_2	Bogen	abwärts
T1_Gleis_120	Bogen_1	Bogen	abwärts
T1_Gleis_120	Klothoide_1	Klothoide	abwärts
T1_Gleis_120	Gerade_1	Gerade	abwärts
T1_W1211	g2	Gerade	abwärts
T1_W1211	g1	Gerade	abwärts
T1_Gleis_110	Gerade_1	Gerade	abwärts
T1_Gleis_110	Klothoide_1	Klothoide	abwärts
T1_Gleis_110	Bogen_2	Bogen	abwärts
T1_Gleis_110	Bogen_1	Bogen	abwärts
T1_W1041	Aussen_Bogen	Bogen	abwärts
T1_Gleis_140	Bogen_2	Bogen	abwärts
T1_Gleis_140	Bogen_1	Bogen	abwärts

Parallel zum Fahrplan werden Betriebsstellen (Operational Control Points, OCP) definiert. Dessen Position ist auf der Gleisachse einer Primitive als Distanz vom Startpunkt definiert. An den Betriebsstellen können Fahrplanzeiten definiert werden. In dem Szenario in Kapitel 6 wird die Bewegungssteuerung jedoch von dem Distanz- und Geschwindigkeitsprofil der Messfahrt des Versuchsfahrzeuges „IFS-Erprobungsträger 1“ bestimmt. So sind in Tabelle 11 markante Punkte auf dem Teststring T1 angegeben.

Tabelle 11: Operational Control Points auf dem PCW Testring T1

Gleis	Primitive	s [m]	OCP-Name
T1_Gleis_110	Bogen_1	521,090	T1_141031_280_1_Startpunkt
T1_Gleis_110	Gerade_1	0,000	T1_Gerade1_Anfang
T1_Gleis_120	Gerade_1	600,891	T1_Gerade1_Ende
T1_Gleis_130	Gerade_2	0,000	T1_Gerade2_Anfang
T1_Gleis_130	Gerade_3	517,101	T1_Gerade2_Ende

In Anhang B.7 sind die Betriebsstellen für das in Abschnitt 7.1.1 dargestellte Szenario im railML-Format dargestellt.

B.3 Ausschnitt aus der railML-Datei zur Streckendefinition

In dem folgenden Ausschnitt aus der railML-Datei der Streckendefinition für das in Abschnitt 6.1 dargestellte Simulationsszenario ist der Dateianfang mit der ersten Primitive dargestellt. Das Schienenfahrzeugmodell wird am OCP „PCW_T1_141031_280_1_Start“ auf die Strecke „gesetzt“. Das Streckenelement „PCW_T1_Gleis_110_Bogen_1“ ist sehr lang, sodass sechs Balisengruppen mit je zwei Festdatenbalisen definiert sind.

Das Streckenelement wurde mit der in Abschnitt 4.7 beschriebenen Software vollautomatisch erstellt. Das railML-Schema [139] ist um zusätzliche Elemente erweitert worden. Die Konfigurationsdaten sind in Abb. 27 dargestellt. Die aus den Konfigurationsdaten erzeugte MATLAB-Workspace-Datenstruktur ist in Abb. 28 aufbereitet.

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<railml>
  <infrastructure id="infrastructure_1" timetableRef="timetable_1">
    <tracks>
      <track id="PCW_T1_Gleis_110_Bogen_1"
        name="PCW_T1_Gleis_110_Bogen_1">
        <trackTopology>
          <trackBegin absPos="0"
            id="PCW_T1_Gleis_110_Bogen_1_trackBegin" pos="0">
            <connection id="con_PCW_T1_Gleis_110_Bogen_1_trackBegin"
              ref="con_PCW_T1_W1041_Aussen_Bogen_trackEnd"/>
            <geoCoord coord="51.1140136770 6.2338327768 131.410204"/>
            <ECEFCoord coord="3988523.591295 435675.465163
              4941619.364711"/>
            <LocalCoord KS="PCW" coord="-289.260753 1877.104017 -
              131.128000" heading="183.0947000000 "/>
          </trackBegin>
          <trackEnd absPos="1223.34"
            id="PCW_T1_Gleis_110_Bogen_1_trackEnd"
            pos="1223.34">
            <connection id="con_PCW_T1_Gleis_110_Bogen_1_trackEnd"
              ref="con_PCW_T1_Gleis_110_Bogen_2_trackBegin"/>
          </trackEnd>
        </trackTopology>
      </track>
    </tracks>
  </infrastructure>
</railml>
```



```

        <geoCoord coord="51.1077648699 6.2221525923 133.218311"/>
        <ECEFCoord coord="3989151.380080 434921.136054
            4941184.317050"/>
        <LocalCoord KS="PCW" coord="-932.901634 1017.964751 -
            133.069000" heading="283.2264412993 "/>
    </trackEnd>
    <crossSections>
        <crossSection id="crs_PCW_T1_141031_280_1_Start"
            ocpRef="ocp_PCW_T1_141031_280_1_Start"
            pos="702.2501"/>
    </crossSections>
</trackTopology>
<ocsElements>
    <balises>
        <balise groupID="1"
            id="bal_PCW_T1_Gleis_110_Bogen_1_trackBegin_1"
            ndx="0" pos="2"/>
        <balise groupID="1"
            id="bal_PCW_T1_Gleis_110_Bogen_1_trackBegin_2"
            ndx="1" pos="4"/>

        ...
        <balise groupID="6"
            id="bal_PCW_T1_Gleis_110_Bogen_1_zw_11" ndx="0"
            pos="1000"/>
        <balise groupID="6"
            id="bal_PCW_T1_Gleis_110_Bogen_1_zw_12" ndx="1"
            pos="1002"/>
    </balises>
</ocsElements>
<trackElements>
    <speedChanges>
        <speedChange dir="up"
            id="v_max_PCW_T1_Gleis_110_Bogen_1_trackBegin"
            pos="0.0" vMax="80"/>
        <speedChange dir="down"
            id="v_max_PCW_T1_Gleis_110_Bogen_1_trackEnd"
            pos="1223.34" vMax="80"/>
    </speedChanges>
    <radiusChanges>
        <radiusChange id="rc_PCW_T1_Gleis_110_Bogen_1_trackBegin"
            pos="0" radius="700" superelevation="150">
            <geoCoord coord="51.1140136770 6.2338327768
                131.410204"/>
        </radiusChange>
        <radiusChange id="rc_PCW_T1_Gleis_110_Bogen_1_trackEnd"
            pos="1223.34" radius="700" superelevation="150">
            <geoCoord coord="51.1077648699 6.2221525923
                133.218311"/>
        </radiusChange>
    </radiusChanges>
</trackElements>
</track>
<track id="PCW_T1_Gleis_110_Bogen_2"

name="PCW_T1_Gleis_110_Bogen_2">
    <trackTopology>
        <trackBegin absPos="1223.34"

            id="PCW_T1_Gleis_110_Bogen_2_trackBegin" pos="0"> ...

```

Abb. 146: Ausschnitt aus der railML-Datei zur Streckendefinition

B.4 SIMPACK-Streckendefinition

Aus dem in Anhang B.2 dargestellten Fahrplan und der im vorangegangenen Anhang dargestellten Streckendefinition wird vom Streckenatlas-Server (Abschnitt 4.4) zu Beginn jedes Simulationsdurchlaufes (und jeder Teilsimulation) eine neue Streckendefinition für die SIMPACK-Mehrkörpersimulation erzeugt. Die Streckendefinition wird als Datei „track.trm“ im SIMPACK-Dateiformat „Measured Track“ zur SIMPACK-Modelldatei kopiert und zu Beginn der Mehrkörpersimulation dynamisch eingebunden.

Nach einem Header und einem Kommentar („!...“) bilden die ersten drei Spalten zeilenweise die dreidimensionalen Koordinaten des Fahrweg-Polygonzuges in dem lokalen Koordinatensystem I_{sys} der SIMPACK-Mehrkörpersimulation. Die vierte Spalte enthält die Gleisüberhöhung an dem Punkt.

```
header.begin
  data.type    = 3      ! File Format Type: 1/2/3 =
                        ! s,psis,gams,u/x,y,z,cmb/x,y,z,u
  data.par(1)  = 1.0    ! UnitFactor = x,y,z[User] / x,y,z[SI]  ([m])
  data.par(4)  = 1      ! 0/1/2=Superelevation about center/inner/outer Rail
  data.par(5)  = 1.506  ! Reference Length of Superelevation [m]
  data.par(7)  = 1      ! Increment for Data Reduction
header.end

! *** erzeugt vom SimU-Streckenatlas ***
! x [m]          y [m]          z [m]          u [m]
! Ursprung ECEF: (x0,y0,z0)=(3989151.380096,434921.136058,4941184.317002)
! g-Vektor: (gx,gy,gz) = (0.000000, 0.000000, -9.810000)

0.000000 0.000000 0.000000 -0.150000
-0.394227 2.333146 0.003731 -0.150000
-0.780609 4.667614 0.007485 -0.150000
-1.159097 7.003374 0.011240 -0.150000
-1.529688 9.340401 0.014994 -0.150000
-1.892376 11.678667 0.018748 -0.150000
-2.247159 14.018146 0.022503 -0.150000
-2.594031 16.358810 0.026257 -0.150000
-2.932989 18.700634 0.030012 -0.150000 ...
```

Abb. 147: SIMPACK-Streckendefinition track.trm im „Measured Track“-Dateiformat

B.5 Wegmarken auf dem PCW Testring T1

Auf der in Abschnitt 6.1 beschrieben (realen) Testfahrt mit dem IFS-Erprobungsträger wurden 10 Integrierte Wegmarken (Anhang A.7.4) auf dem Testring T1 des PCWs ausgelegt und (in einer früheren Messfahrt am 24.07.2014) die Position der Wegmarken geodätisch (Abb. 126) vermessen. Die in Tabelle 12 dargestellten Eigenschaften werden dem Simulink-Zentralmodell separat als strukturierte MATLAB-Workspace-variable übergeben und sind nicht Teil der Streckendefinition der railML-Datei.

Tabelle 12: Eigenschaften der Integrierten Wegmarken auf der Testfahrt am 31.10.2014 auf dem Testring T1 des PCWs

WM – Wegmarke

Nr.	km T1	RFID-ID			WGS84		
		Hilfs- WM	Haupt- WM	Hilfs- WM	Breitengrad	Längengrad	Höhe
	[m]	km<WM	WM	km>WM	[°]	[°]	[m]
1	600	1	5	2	51,109248018	6,230445789	131,734
2	1200	3	6	4	51,107734621	6,222485991	132,689
3	1700	7	10	8	51,109466020	6,215954099	132,630
4	2200	9	11	18	51,111573667	6,209647544	132,647
5	3000	19	12	20	51,117095059	6,203245794	131,741
6	3600	21	13	22	51,121985906	6,206184735	129,778
7	4200	23	14	24	51,123788108	6,213991175	128,318
8	4600	25	15	26	51,122611470	6,219328015	129,813
9	5200	27	16	28	51,120047361	6,226998087	130,372
10	6000	29	17	30	51,114754155	6,233754241	130,763

B.6 Pseudolitenpositionen des railGATE

Das Galileo-Testzentrum railGATE sendet an acht Masten Pseudosatellitensignale aus. In folgender Tabelle sind die Positionen der Sendeantennen (PSL W1–W8) aufgeführt. In der Mitte der Testumgebung befindet sich eine Referenzstation (REF). Die in Tabelle 13 dokumentierten Antennenpositionen der Pseudolite werden als strukturierte MATLAB-Workspacevariable in das Simulink-Zentralmodell integriert. Über einen manuellen Schalter im GNSS-Weltraumsegment (Simulink-Block „GNSS space segment“) wird zwischen den aus den Ephemeridendaten berechnete Satellitenpositionen und den statischen Pseudolite-Positionen umgeschaltet.

Tabelle 13: Positionen der railGATE Pseudolite-Sendeantennen

PSL	WGS84			ECEF		
	Breitengrad	Längengrad	Höhe	X	Y	Z
	[°]	[°]	[m]	[m]	[m]	[m]
W1	51,1191249291	6,2290584736	172,469	3988145,471	435297,879	4942008,285
W2	51,1176880986	6,2412429878	178,877	3988180,507	436159,953	4941912,931
W3	51,1091154141	6,2320851247	194,908	3988998,172	435604,180	4941326,668
W4	51,1092223069	6,2246429639	193,890	3989044,881	435084,971	4941333,342
W5	51,1102203833	6,2071631486	165,117	3989073,552	433856,674	4941380,660
W6	51,1135200750	6,2040347778	183,044	3988824,354	433609,205	4941625,082
W7	51,1219935708	6,2014733486	195,739	3988122,112	433352,470	4942226,723
W8	51,1246266247	6,2139321849	176,635	3987789,155	434193,686	4942395,712
Referenzstation						
REF	51,1162357641	6,2211801836	140,326	3988433,968	434774,424	4941781,495

B.7 Szenariodaten aus Abschnitt 7.1.1 – Fahrplandefinition im railML-Format

In Anhang B.2 wurde der Fahrplan für das Szenario aus Kapitel 6 in tabellarischer Form dargestellt. In Abschnitt 7.1.1 wird ein weiteres Szenario beschrieben, das dieselbe Gleisnetzdefinition nutzt, jedoch mit einem anderen Fahrplan.

Der nachfolgend beschriebenen Ausschnitte aus der Szenariodefinition im railML-Format zeigen die Fahrplandefinition für das Szenario aus Abschnitt 7.1.1.

In jeder der hier verwendeten railML-Dateien steht ein Abschnitt zur Infrastruktur (<infrastructure>), zum Fahrplan (<timetable...>) und zum Rollmaterial (<trains>). Die einzelnen Abschnitte können in unterschiedlichen Dateien oder in einer/mehreren Dateien verteilt sein. In der vorliegenden Konfiguration werden alle Abschnitte in einer einzigen railML-Datei konzentriert.

Der Beginn des Infrastrukturabschnittes wurde bereits die Definition der Betriebsstellen (<operationControlPoints>, abgekürzt: OCP) bei der Beschreibung der Primitiven in Anhang B.3 gezeigt. Am Ende des Infrastrukturabschnittes steht nun eine zusammenfassende Auflistung der Betriebsstellen.

```
<infrastructure>
...
<operationControlPoints>
  <ocp id="ocp_PCW_T1_141031_280_1_Start"/>
  <ocp id="ocp_PCW_T1_Gerade1_Anfang"/>
  <ocp id="ocp_PCW_T1_Gerade1_Ende"/>
  <ocp id="ocp_PCW_T1_Gerade2_Anfang"/>
  <ocp id="ocp_PCW_T1_Gerade2_Ende"/>
  <ocp id="ocp_PCW_T1_W1041_Aussen_Bogen_Ende"/>
</operationControlPoints>
</infrastructure>
```

Abb. 148: Ausschnitt aus der railML-Datei, Betriebsstellen (OCPs)

Innerhalb der Fahrplanabschnitte (<ocpsTT>) wird die relevante Betriebsstelle referenziert (<ocpTT ocpRef=). Die während des Fahrplanabschnittes zu befahrenden Gleisabschnitte werden in der Reihenfolge mit Richtungsangabe (<sectionTT>) angegeben. Die Fahrplanzeiten (<times departure...>) sind ebenfalls enthalten. Das Fahrermodell in Abschnitt 5.5 wird in der aktuellen Implementierung jedoch als ein rein zeitoptimales Fahrverhalten modelliert, sodass die Ankunftszeiten der Fahrplanabschnitte noch ignoriert werden.

```
<timetable id="timetable_1" infrastructureRef="infrastructure_1">
  <trainParts>
    <trainPart description="Testfahrt" id="trainPart_1"
      trainNumber="1234">
      <ocpsTT>
        <ocpTT ocpRef="ocp_PCW_T1_Gerade1_Anfang" ocpType="start"
          sequence="1">
          <times departure="02:18:50.000" scope="scheduled"/>
          <sectionTT>
            <trackRef dir="up" ref="PCW_T1_Gleis_110_Gerade_1"/>
            <trackRef dir="up" ref="PCW_T1_W1211_g1"/>
            <trackRef dir="up" ref="PCW_T1_W1211_g2"/>
            <trackRef dir="up" ref="PCW_T1_Gleis_120_Gerade_1"/>
          </sectionTT>
        </ocpTT>
        <ocpTT ocpRef="ocp_PCW_T1_Gerade1_Ende" ocpType="pass"
          sequence="2">
          <times departure="02:20:0.000" scope="scheduled"/>
          <sectionTT>
            <trackRef dir="up" ref="PCW_T1_Gleis_120_Klotoide_1"/>
            <trackRef dir="up" ref="PCW_T1_Gleis_120_Bogen_1"/>
            <trackRef dir="up" ref="PCW_T1_Gleis_120_Bogen_2"/>
            <trackRef dir="up" ref="PCW_T1_W1212_Aussen_Bogen"/>
            <trackRef dir="up" ref="PCW_T1_Gleis_130_Bogen_1"/>
            <trackRef dir="up" ref="PCW_T1_Gleis_130_Bogen_2"/>
            <trackRef dir="up" ref="PCW_T1_Gleis_130_Klotoide_1"/>
          </sectionTT>
        </ocpTT>
        <ocpTT ocpRef="ocp_PCW_T1_Gerade2_Anfang" ocpType="pass"
          sequence="3">
          <times departure="02:22:0.000" scope="scheduled"/>
          <sectionTT>
            <trackRef dir="up" ref="PCW_T1_Gleis_130_Gerade_2"/>

```

```

        <trackRef dir="up" ref="PCW_T1_Gleis_130_Gerade_3"/>
    </sectionTT>
</ocpTT>
<ocpTT ocpRef="ocp_PCW_T1_Gerade2_Ende" ocpType="stop"
    sequence="4">
    <times departure="02:25:0.000" scope="scheduled"/>
    <sectionTT>
        <trackRef dir="up" ref="PCW_T1_Gleis_130_Gerade_3"/>
    </sectionTT>
    </ocpTT>
</ocpsTT>
</trainPart>
</trainParts>
<trains>
    <train id="EPT1" type="testcar">
        <trainPartSequence sequence="1">
            <trainPartRef position="1" ref="trainPart_1"/>
        </trainPartSequence>
    </train>
</trains>
</timetable>
</railml>

```

Abb. 149: Ausschnitt aus der railML-Datei, Fahrplan und Zugparameter

B.8 Broadcast-Ephemeriden der GPS-Satelliten aus Abschnitt 7.3

Die Broadcast-Ephemeriden enthalten die Bahndaten von GNSS-Satelliten und werden von den GNSS-Satelliten kontinuierlich ausgesendet. Aus den Ephemeriden werden von den GNSS-Empfängern für jeden Zeitpunkt (siehe Abschnitt 5.13.1) die aktuellen Positionen der GNSS-Satelliten berechnet. Parallel sind die Ephemeriden von Internet-Servern, wie hier als Quelle angegeben, abrufbar. Die hier aufgeführten Bahndaten im RINEX-Format enthalten die Bahndaten aller aktiven GPS-Satelliten für den Zeitpunkt: 31.10.2014 2:00:00 Uhr.

Quelle:

ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gnss/data/daily/2014/304/14n/brdc3040_020000.14n.Z

Datenformat: <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/rinex/rinex211.txt> Zeile: 1273ff

```

      2                NAVIGATION DATA                RINEX VERSION / TYPE
CCRINEXN V1.6.0 UX  CDDIS                01-NOV-14 17:31    PGM / RUN BY / DATE
IGS BROADCAST EPHEMERIS FILE                                COMMENT
    0.2794D-07 -0.7451D-08 -0.1192D-06  0.1192D-06        ION ALPHA
    0.1372D+06 -0.4915D+05 -0.1311D+06 -0.2621D+06        ION BETA
    0.000000000000D+00-0.888178419700D-15  589824  1816 DELTA-UTC: A0,A1,T,W
    16                                                    LEAP SECONDS
                                                    END OF HEADER
2 14 10 31  1 59 44.0 0.527277123183D-03 0.216004991671D-11 0.000000000000D+00
    0.500000000000D+01-0.322500000000D+02 0.480591447134D-08 0.204870677467D+01
    -0.167824327946D-05 0.138788335025D-01 0.102072954178D-04 0.515370859337D+04
    0.439184000000D+06-0.307336449623D-06 0.179698383152D+01-0.230967998505D-06
    0.939649293125D+00 0.171250000000D+03-0.237549271740D+01-0.815569686037D-08
    0.216080429189D-09 0.000000000000D+00 0.181600000000D+04 0.000000000000D+00

```

B Details der Konfiguration zu den Ergebniskapiteln Kapitel 6 und Kapitel 7

```
0.200000000000D+01 0.000000000000D+00-0.204890966415D-07 0.500000000000D+01
0.432000000000D+06 0.400000000000D+01 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
16 14 10 31 1 59 44.0-0.184317585081D-03 0.272848410532D-11 0.000000000000D+00
0.190000000000D+02 0.180625000000D+02 0.404945454946D-08-0.175833770811D+01
0.916421413422D-06 0.769953173585D-02 0.482797622681D-05 0.515368425751D+04
0.439184000000D+06-0.223517417908D-07-0.208891612991D+00-0.109896063805D-06
0.989461561560D+00 0.302718750000D+03 0.233758421777D+00-0.803962052487D-08
0.199294011849D-09 0.100000000000D+01 0.181600000000D+04 0.000000000000D+00
0.200000000000D+01 0.000000000000D+00-0.102445483208D-07 0.190000000000D+02
0.432630000000D+06 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
29 14 10 31 1 59 44.0 0.570105854422D-03 0.238742359215D-11 0.000000000000D+00
0.120000000000D+02-0.768437500000D+02 0.434446667876D-08 0.387799511578D-01
-0.399351119995D-05 0.111379276495D-02 0.743009150028D-05 0.515361311912D+04
0.439184000000D+06-0.149011611938D-07 0.829497648958D+00 0.000000000000D+00
0.970962238303D+00 0.243406250000D+03-0.842470060397D+00-0.809569436102D-08
-0.132862677121D-09 0.000000000000D+00 0.181600000000D+04 0.000000000000D+00
0.200000000000D+01 0.000000000000D+00-0.977888703346D-08 0.120000000000D+02
0.436860000000D+06 0.400000000000D+01 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
1 14 10 31 2 0 0.0-0.126510858536D-04 0.454747350886D-12 0.000000000000D+00
0.600000000000D+02-0.328125000000D+02 0.439661170795D-08 0.132281032889D+01
-0.171549618244D-05 0.361608772073D-02 0.106692314148D-04 0.515367696762D+04
0.439200000000D+06 0.931322574616D-08 0.183001755457D+01 0.521540641785D-07
0.961085535607D+00 0.173593750000D+03 0.444337946722D+00-0.795890294883D-08
0.176793078427D-09 0.100000000000D+01 0.181600000000D+04 0.000000000000D+00
0.200000000000D+01 0.000000000000D+00 0.558793544769D-08 0.600000000000D+02
0.432018000000D+06 0.400000000000D+01 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
3 14 10 31 2 0 0.0 0.282221008092D-03 0.363797880709D-11 0.000000000000D+00
0.113000000000D+03 0.315937500000D+02 0.563452041468D-08-0.170716982956D+01
0.168196856976D-05 0.731075799558D-02 0.697746872902D-05 0.515371426964D+04
0.439200000000D+06 0.180676579475D-06 0.285910116390D+01 0.186264514923D-07
0.923515626898D+00 0.221375000000D+03-0.205822961650D+01-0.852178353792D-08
0.231081054025D-09 0.100000000000D+01 0.181600000000D+04 0.000000000000D+00
0.400000000000D+01 0.000000000000D+00-0.176951289177D-07 0.113000000000D+03
0.433650000000D+06 0.400000000000D+01 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
4 14 10 31 2 0 0.0-0.229896977544D-05-0.568434188608D-12 0.000000000000D+00
0.450000000000D+02-0.366562500000D+02 0.494770609182D-08 0.898459858837D+00
-0.190362334251D-05 0.112244855845D-01 0.108461827040D-04 0.515200107765D+04
0.439200000000D+06-0.128522515297D-06 0.181258501458D+01 0.502914190292D-07
0.938668269038D+00 0.160843750000D+03 0.109186110188D+01-0.840106422376D-08
0.128219626576D-09 0.100000000000D+01 0.181600000000D+04 0.000000000000D+00
0.200000000000D+01 0.000000000000D+00-0.651925802231D-08 0.450000000000D+02
0.432018000000D+06 0.400000000000D+01 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
5 14 10 31 2 0 0.0-0.323551241308D-03 0.432009983342D-11 0.000000000000D+00
0.640000000000D+02 0.292187500000D+02 0.511521306916D-08-0.189480413982D+01
0.123493373394D-05 0.393683824223D-02 0.722892582417D-05 0.515370652199D+04
0.439200000000D+06 0.484287738800D-07 0.286616024980D+01-0.372529029846D-07
0.947167687027D+00 0.231625000000D+03 0.378698845961D+00-0.833963309348D-08
0.224652214809D-09 0.000000000000D+00 0.181600000000D+04 0.000000000000D+00
0.200000000000D+01 0.000000000000D+00-0.107102096081D-07 0.640000000000D+02
0.432000000000D+06 0.400000000000D+01 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
6 14 10 31 2 0 0.0 0.458722934127D-05 0.409272615798D-11 0.000000000000D+00
0.940000000000D+02-0.265312500000D+02 0.432125142604D-08-0.192648212256D+01
-0.125914812088D-05 0.591540010646D-03 0.100564211607D-04 0.515363302040D+04
0.439200000000D+06 0.204890966415D-07 0.182146157871D+01-0.335276126862D-07
0.960997740042D+00 0.184781250000D+03 0.218046970385D+01-0.792997317236D-08
0.228938107620D-09 0.000000000000D+00 0.181600000000D+04 0.000000000000D+00
0.200000000000D+01 0.000000000000D+00 0.465661287308D-08 0.940000000000D+02
0.432000000000D+06 0.400000000000D+01 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
7 14 10 31 2 0 0.0 0.407780054957D-03 0.386535248253D-11 0.000000000000D+00
0.500000000000D+02 0.448437500000D+02 0.429410743824D-08 0.808108658729D+00
0.251270830631D-05 0.800050643738D-02 0.887177884579D-05 0.515361132812D+04
0.439200000000D+06 0.372529029846D-08-0.129275030282D+01 0.875443220139D-07
0.971995765056D+00 0.212562500000D+03-0.276086943183D+01-0.806569311135D-08
-0.176435920693D-09 0.000000000000D+00 0.181600000000D+04 0.000000000000D+00
0.200000000000D+01 0.000000000000D+00-0.111758708954D-07 0.500000000000D+02
0.432000000000D+06 0.400000000000D+01 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
8 14 10 31 2 0 0.0 0.161286443472D-04 0.113686837722D-12 0.000000000000D+00
```

```

0.650000000000D+02 0.547500000000D+02 0.369908265307D-08 0.133571865866D+01
0.306405127049D-05 0.147277173819D-01 0.100675970316D-04 0.515219034386D+04
0.439200000000D+06-0.502914190292D-07-0.118982416173D+01 0.206753611565D-06
0.995480560984D+00 0.204781250000D+03-0.269411479313D+01-0.788354266691D-08
-0.200365488884D-09 0.100000000000D+01 0.181600000000D+04 0.000000000000D+00
0.200000000000D+01 0.630000000000D+02-0.465661287308D-08 0.650000000000D+02
0.432018000000D+06 0.400000000000D+01 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
9 14 10 31 2 0 0.0 0.253738835454D-05-0.625277607469D-11 0.000000000000D+00
0.110000000000D+02 0.200000000000D+01 0.485805950054D-08 0.196961706819D+01
0.130385160446D-06 0.276681734249D-03 0.750273466110D-05 0.515371603775D+04
0.439200000000D+06-0.372529029846D-08-0.236793630372D+01-0.279396772385D-07
0.959348528123D+00 0.236468750000D+03-0.284373317729D+01-0.822141388346D-08
-0.285011871889D-09 0.000000000000D+00 0.181600000000D+04 0.000000000000D+00
0.200000000000D+01 0.000000000000D+00 0.465661287308D-09 0.110000000000D+02
0.432000000000D+06 0.400000000000D+01 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
10 14 10 31 2 0 0.0-0.147799029946D-03-0.159161572810D-11 0.000000000000D+00
0.147000000000D+03 0.302187500000D+02 0.516164357460D-08-0.162845695177D+01
0.154785811901D-05 0.142038071062D-01 0.665709376335D-05 0.515362571144D+04
0.439200000000D+06 0.240281224251D-06 0.288249758787D+01-0.465661287308D-07
0.941969549956D+00 0.234500000000D+03 0.895576004038D+00-0.826105839195D-08
0.286440502825D-09 0.000000000000D+00 0.181600000000D+04 0.000000000000D+00
0.280000000000D+01 0.000000000000D+00-0.325962901115D-08 0.147000000000D+03
0.432000000000D+06 0.400000000000D+01 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
11 14 10 31 2 0 0.0-0.532746315002D-03-0.284217094304D-11 0.000000000000D+00
0.140000000000D+02-0.728437500000D+02 0.607525305867D-08 0.910000145159D+00
-0.380724668503D-05 0.156238232739D-01 0.100098550320D-04 0.515371937180D+04
0.439200000000D+06-0.230967998505D-06 0.149441266474D+01-0.800937414169D-07
0.891242615398D+00 0.154000000000D+03 0.135418631267D+01-0.905287708867D-08
-0.464305054455D-11 0.100000000000D+01 0.181600000000D+04 0.000000000000D+00
0.200000000000D+01 0.000000000000D+00-0.121071934700D-07 0.140000000000D+02
0.432018000000D+06 0.400000000000D+01 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
12 14 10 31 2 0 0.0 0.242698937655D-03 0.272848410532D-11 0.000000000000D+00
0.550000000000D+02 0.859375000000D+01 0.410409952365D-08 0.414139963095D+00
0.447034835815D-06 0.496766122524D-02 0.463053584099D-05 0.515379131699D+04
0.439200000000D+06 0.614672899246D-07-0.227501215402D+00 0.102445483208D-06
0.988880570959D+00 0.304062500000D+03 0.504469829468D+00-0.809533720329D-08
0.264296723305D-10 0.100000000000D+01 0.181600000000D+04 0.000000000000D+00
0.200000000000D+01 0.000000000000D+00-0.121071934700D-07 0.550000000000D+02
0.432000000000D+06 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
13 14 10 31 2 0 0.0-0.560367479920D-04-0.352429196937D-11 0.000000000000D+00
0.880000000000D+02 0.187500000000D+01 0.435803867266D-08 0.253003986714D+01
0.193715095520D-06 0.586713571101D-02 0.806339085102D-05 0.515590940285D+04
0.439200000000D+06 0.596046447754D-07-0.225619530585D+01 0.149011611938D-07
0.976123792183D+00 0.231593750000D+03 0.222572377849D+01-0.788282835144D-08
-0.337871216549D-09 0.000000000000D+00 0.181600000000D+04 0.000000000000D+00
0.200000000000D+01 0.000000000000D+00-0.111758708954D-07 0.880000000000D+02
0.432000000000D+06 0.400000000000D+01 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
14 14 10 31 2 0 0.0 0.120331533253D-03-0.363797880709D-11 0.000000000000D+00
0.530000000000D+02 0.144062500000D+02 0.448947271884D-08-0.284028846603D+01
0.786036025970D-06 0.787474936806D-02 0.824406743050D-05 0.515374066734D+04
0.439200000000D+06 0.216066837311D-06-0.228926960879D+01-0.763684511185D-07
0.968665727559D+00 0.222281250000D+03-0.196766035236D+01-0.794390232399D-08
-0.329656588663D-09 0.100000000000D+01 0.181600000000D+04 0.000000000000D+00
0.200000000000D+01 0.000000000000D+00-0.931322574616D-08 0.530000000000D+02
0.432018000000D+06 0.400000000000D+01 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
15 14 10 31 2 0 0.0-0.211747363210D-03-0.227373675443D-11 0.000000000000D+00
0.330000000000D+02 0.828125000000D+01 0.529200614758D-08 0.280377470811D+01
0.456348061562D-06 0.676011282485D-02 0.766105949879D-05 0.515379353523D+04
0.439200000000D+06-0.122934579849D-06-0.240647563996D+01-0.204890966415D-07
0.935347301632D+00 0.219156250000D+03 0.296656719183D+00-0.831963226036D-08
-0.267153985179D-09 0.000000000000D+00 0.181600000000D+04 0.000000000000D+00
0.200000000000D+01 0.000000000000D+00-0.102445483208D-07 0.330000000000D+02
0.434220000000D+06 0.400000000000D+01 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
16 14 10 31 2 0 0.0-0.184318050742D-03 0.272848410532D-11 0.000000000000D+00
0.970000000000D+02 0.180625000000D+02 0.404981159718D-08-0.175600432451D+01
0.916421413422D-06 0.769953429699D-02 0.482797622681D-05 0.515368425560D+04
0.439200000000D+06-0.223517417908D-07-0.208891718321D+00-0.109896063805D-06

```


B Details der Konfiguration zu den Ergebniskapiteln Kapitel 6 und Kapitel 7

```
0.989461564486D+00 0.302718750000D+03 0.233758786043D+00-0.803962052487D-08
0.199294011849D-09 0.100000000000D+01 0.181600000000D+04 0.000000000000D+00
0.280000000000D+01 0.000000000000D+00-0.102445483208D-07 0.970000000000D+02
0.432000000000D+06 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
17 14 10 31 2 0 0.0-0.134325120598D-03-0.261479726760D-11 0.000000000000D+00
0.900000000000D+01-0.845312500000D+02 0.422339020687D-08-0.265892398859D+01
-0.429153442383D-05 0.963760726154D-02 0.665150582790D-05 0.515366714859D+04
0.439200000000D+06 0.540167093277D-07 0.820308744512D+00-0.108033418655D-06
0.970187194545D+00 0.255375000000D+03-0.209048570204D+01-0.785997025645D-08
0.392873507616D-11 0.000000000000D+00 0.181600000000D+04 0.000000000000D+00
0.200000000000D+01 0.000000000000D+00-0.107102096081D-07 0.900000000000D+01
0.432000000000D+06 0.400000000000D+01 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
18 14 10 31 2 0 0.0 0.354984309524D-03 0.261479726760D-11 0.000000000000D+00
0.210000000000D+02 0.310312500000D+02 0.566237871794D-08-0.117427194985D+01
0.196322798729D-05 0.154788586078D-01 0.691786408424D-05 0.515373471260D+04
0.439200000000D+06 0.162050127983D-06 0.285752006398D+01 0.379979610443D-06
0.925721091474D+00 0.226906250000D+03-0.200610345492D+01-0.867750431003D-08
0.174650132022D-09 0.100000000000D+01 0.181600000000D+04 0.000000000000D+00
0.200000000000D+01 0.000000000000D+00-0.111758708954D-07 0.210000000000D+02
0.432018000000D+06 0.400000000000D+01 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
19 14 10 31 2 0 0.0-0.485937111080D-03-0.170530256582D-11 0.000000000000D+00
0.460000000000D+02-0.921562500000D+02 0.433589489314D-08 0.276035599732D+01
-0.480189919472D-05 0.106470471947D-01 0.706873834133D-05 0.515366641998D+04
0.439200000000D+06-0.372529029846D-07 0.870607658498D+00-0.949949026108D-07
0.967245020518D+00 0.247875000000D+03 0.511777059923D+00-0.802247702551D-08
-0.118219210019D-09 0.100000000000D+01 0.181600000000D+04 0.000000000000D+00
0.200000000000D+01 0.000000000000D+00-0.149011611938D-07 0.460000000000D+02
0.432018000000D+06 0.400000000000D+01 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
20 14 10 31 2 0 0.0 0.251200981438D-03 0.420641299570D-11 0.000000000000D+00
0.740000000000D+02 0.302187500000D+02 0.564952103951D-08-0.661248167732D+00
0.163167715073D-05 0.616148451809D-02 0.764802098274D-05 0.515369726944D+04
0.439200000000D+06-0.558793544769D-07 0.280463816917D+01 0.465661287308D-07
0.926797335435D+00 0.218750000000D+03 0.133342068353D+01-0.865750347691D-08
0.251796202608D-09 0.100000000000D+01 0.181600000000D+04 0.000000000000D+00
0.200000000000D+01 0.000000000000D+00-0.838190317154D-08 0.740000000000D+02
0.432018000000D+06 0.400000000000D+01 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
21 14 10 31 2 0 0.0-0.392252579331D-03-0.204636307899D-11 0.000000000000D+00
0.870000000000D+02-0.149375000000D+02 0.516271504780D-08-0.218032609796D+00
-0.679865479469D-06 0.217221211642D-01 0.107921659946D-04 0.515367387581D+04
0.439200000000D+06-0.160187482834D-06 0.181316459932D+01 0.361353158951D-06
0.932646070212D+00 0.161687500000D+03-0.198341355748D+01-0.871071997931D-08
0.300369654459D-09 0.100000000000D+01 0.181600000000D+04 0.000000000000D+00
0.200000000000D+01 0.000000000000D+00-0.116415321827D-07 0.870000000000D+02
0.432018000000D+06 0.400000000000D+01 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
22 14 10 31 2 0 0.0 0.282221008092D-03 0.363797880709D-11 0.000000000000D+00
0.113000000000D+03 0.315937500000D+02 0.563452041468D-08-0.170716982956D+01
0.168196856976D-05 0.731075799558D-02 0.697746872902D-05 0.515371426964D+04
0.439200000000D+06 0.180676579475D-06 0.285910116390D+01 0.186264514923D-07
0.923515626898D+00 0.221375000000D+03-0.205822961650D+01-0.852178353792D-08
0.2310810504025D-09 0.100000000000D+01 0.181600000000D+04 0.000000000000D+00
0.400000000000D+01 0.000000000000D+00-0.176951289177D-07 0.113000000000D+03
0.432018000000D+06 0.400000000000D+01 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
23 14 10 31 2 0 0.0-0.637527555227D-04-0.284217094304D-11 0.000000000000D+00
0.530000000000D+02 0.225000000000D+01 0.503020952842D-08 0.232178122954D+01
0.126659870148D-06 0.968457025010D-02 0.777095556259D-05 0.515371315193D+04
0.439200000000D+06-0.203028321266D-06-0.235742722543D+01-0.689178705216D-07
0.950423608707D+00 0.227875000000D+03-0.271969952896D+01-0.826070123422D-08
-0.315727437029D-09 0.100000000000D+01 0.181600000000D+04 0.000000000000D+00
0.200000000000D+01 0.000000000000D+00-0.200234353542D-07 0.530000000000D+02
0.438108000000D+06 0.400000000000D+01 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
24 14 10 31 2 0 0.0-0.376803800464D-04-0.568434188608D-12 0.000000000000D+00
0.890000000000D+02 0.532812500000D+02 0.467269463649D-08 0.172317488042D+01
0.284239649773D-05 0.242249015719D-02 0.827759504318D-05 0.515370623589D+04
0.439200000000D+06 0.186264514923D-07-0.133007262142D+01 0.968575477600D-07
0.955279962765D+00 0.216218750000D+03 0.207896676554D+00-0.820498462769D-08
-0.100004165575D-09 0.100000000000D+01 0.181600000000D+04 0.000000000000D+00
0.200000000000D+01 0.000000000000D+00 0.279396772385D-08 0.890000000000D+02
```

```
0.434850000000D+06 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
25 14 10 31 2 0 0.0 0.163419172168D-04-0.159161572810D-11 0.000000000000D+00
0.400000000000D+02 0.144375000000D+02 0.436089593453D-08-0.360398611226D+00
0.674277544022D-06 0.375874864403D-02 0.457279384136D-05 0.515377502823D+04
0.439200000000D+06 0.745058059692D-07-0.271697015100D+00 0.130385160446D-07
0.977496402866D+00 0.299000000000D+03 0.712304233988D+00-0.826320133836D-08
0.510735559900D-10 0.100000000000D+01 0.181600000000D+04 0.000000000000D+00
0.200000000000D+01 0.000000000000D+00 0.512227416039D-08 0.400000000000D+02
0.435090000000D+06 0.400000000000D+01 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
26 14 10 31 2 0 0.0-0.106494408101D-03-0.129602995003D-10 0.000000000000D+00
0.870000000000D+02 0.875000000000D+01 0.427124934325D-08 0.231896659271D+01
0.201165676117D-06 0.212764499011D-01 0.818818807602D-05 0.515368568638D+04
0.439200000000D+06 0.143423676491D-06-0.226560677866D+01-0.279396772385D-06
0.973493902889D+00 0.224562500000D+03 0.129589229390D+01-0.764638993140D-08
-0.318584698903D-09 0.000000000000D+00 0.181600000000D+04 0.000000000000D+00
0.280000000000D+01 0.000000000000D+00-0.651925802231D-08 0.870000000000D+02
0.432000000000D+06 0.400000000000D+01 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
27 14 10 31 2 0 0.0 0.262507237494D-04 0.284217094304D-11 0.000000000000D+00
0.150000000000D+02-0.879062500000D+02 0.447732935588D-08-0.280944251064D+01
-0.448711216450D-05 0.153572030831D-02 0.659562647343D-05 0.515368148231D+04
0.439200000000D+06 0.447034835815D-07 0.773806190717D+00 0.502914190292D-07
0.965030401001D+00 0.254750000000D+03 0.311008425378D+00-0.820248452355D-08
-0.100718481043D-09 0.100000000000D+01 0.181600000000D+04 0.000000000000D+00
0.200000000000D+01 0.000000000000D+00 0.139698386192D-08 0.150000000000D+02
0.432018000000D+06 0.400000000000D+01 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
28 14 10 31 2 0 0.0 0.394992996007D-03 0.261479726760D-11 0.000000000000D+00
0.102000000000D+03 0.177812500000D+02 0.392909223389D-08-0.188526164369D+01
0.110268592834D-05 0.194988081930D-01 0.458583235741D-05 0.515368155289D+04
0.439200000000D+06 0.359490513802D-06-0.203288565065D+00 0.212341547012D-06
0.988028247091D+00 0.303187500000D+03-0.170372371244D+01-0.776210903728D-08
0.832177520677D-10 0.100000000000D+01 0.181600000000D+04 0.000000000000D+00
0.290000000000D+01 0.000000000000D+00-0.111758708954D-07 0.102000000000D+03
0.432000000000D+06 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
29 14 10 31 2 0 0.0 0.570107251406D-03 0.238742359215D-11 0.000000000000D+00
0.870000000000D+02-0.768437500000D+02 0.434446667876D-08 0.411149585916D-01
-0.399351119995D-05 0.111379148439D-02 0.743009150028D-05 0.515361312103D+04
0.439200000000D+06-0.149011611938D-07 0.829497527536D+00 0.000000000000D+00
0.970962261710D+00 0.243406250000D+03-0.842471163437D+00-0.809569436102D-08
-0.132862677121D-09 0.100000000000D+01 0.181600000000D+04 0.000000000000D+00
0.280000000000D+01 0.000000000000D+00-0.977888703346D-08 0.870000000000D+02
0.432018000000D+06 0.400000000000D+01 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
30 14 10 31 2 0 0.0-0.768429599702D-04-0.295585778076D-11 0.000000000000D+00
0.280000000000D+02 0.399375000000D+02 0.456519015849D-08 0.599786406140D+00
0.206194818020D-05 0.102952646557D-02 0.864267349243D-05 0.515364753342D+04
0.439200000000D+06-0.167638063431D-07-0.124046115608D+01-0.335276126862D-07
0.957664457792D+00 0.208093750000D+03-0.307810473144D+01-0.815248244076D-08
-0.100004165575D-09 0.000000000000D+00 0.181600000000D+04 0.000000000000D+00
0.200000000000D+01 0.000000000000D+00 0.325962901115D-08 0.280000000000D+02
0.432000000000D+06 0.400000000000D+01 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
31 14 10 31 2 0 0.0 0.329785980284D-03 0.568434188608D-12 0.000000000000D+00
0.800000000000D+01 0.557500000000D+02 0.409874215763D-08 0.773625416467D+00
0.273063778877D-05 0.816885090899D-02 0.920705497265D-05 0.515366173363D+04
0.439200000000D+06 0.137835741043D-06-0.128591206050D+01-0.108033418655D-06
0.976910533433D+00 0.208125000000D+03-0.623171559791D+00-0.797497504686D-08
-0.100718481043D-09 0.100000000000D+01 0.181600000000D+04 0.000000000000D+00
0.200000000000D+01 0.000000000000D+00-0.135041773319D-07 0.800000000000D+01
0.435858000000D+06 0.400000000000D+01 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
32 14 10 31 2 0 0.0-0.305276829749D-03 0.886757334229D-11 0.000000000000D+00
0.800000000000D+02 0.327187500000D+02 0.513342811360D-08 0.128176115626D+01
0.165402889252D-05 0.114199699601D-01 0.716187059879D-05 0.515362098312D+04
0.439200000000D+06 0.372529029846D-07 0.295497227137D+01 0.178813934326D-06
0.947675501003D+00 0.235906250000D+03-0.485298671323D-01-0.831963226036D-08
0.385730352932D-10 0.100000000000D+01 0.181600000000D+04 0.000000000000D+00
0.200000000000D+01 0.000000000000D+00-0.325962901115D-08 0.800000000000D+02
0.432018000000D+06 0.400000000000D+01 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
```

Abb. 150: Broadcast-Ephemeriden der GPS-Satelliten aus Abschnitt 7.3

B.9 Final Orbit Combination der GPS-Satelliten

Unabhängig von den Broadcast-Ephemeriden sind die vermessenen GNSS-Satellitenpositionen im SP3c-Format auf Internetservern verfügbar. Der hier dargestellte Datensatz wurde zur Validierung der GNSS-Satellitenpositionsberechnung genutzt. Die Daten beziehen sich auf den Zeitpunkt: 31.10.2014 2:00:00.0 Uhr.

Quellen: <ftp://ftp.igs.org/pub/gps/1816/igs18165.sp3.Z>

Datenformat: <ftp://ftp.igs.org/pub/data/format/sp3c.txt>

```
#cP2014 10 31 0 0 0.00000000 96 ORBIT Igb08 HLM IGS
## 1816 432000.00000000 900.00000000 56961 0.00000000000000
+ 31 G01G02G04G05G06G07G08G09G10G11G12G13G14G15G16G17G18
+ G19G20G21G22G23G24G25G26G27G28G29G30G31G32 0 0 0
+ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
+ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
+ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
++ 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
++ 3 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 0 0 0 0
++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
%G G cc GPS ccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc
%c cc cc ccc ccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc
%f 1.2500000 1.025000000 0.00000000000 0.0000000000000000
%f 0.0000000 0.000000000 0.00000000000 0.0000000000000000
%i 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
%i 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
/* FINAL ORBIT COMBINATION FROM WEIGHTED AVERAGE OF:
/* cod emr esa gfs grg jpl mit ngs sio
/* REFERENCED TO IGS TIME (IGST) AND TO WEIGHTED MEAN POLE:
/* PCV:IGS08_1816 OL/AL:FES2004 NONE Y ORB:CMB CLK:CMB
...
* 2014 10 31 2 0 0.00000000
PG01 -15818.093305 97.366083 21307.051950 -12.663294 6 5 3 121
PG02 13910.218998 21922.053298 -6379.526065 527.263008 7 7 8 121
PG03 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0 0 000
PG04 -17187.092686 -5316.782670 19265.556343 -2.311246 5 6 5 107
PG05 11226.583699 10779.661981 -21564.085049 -323.564203 8 6 7 115
PG06 5507.816057 25410.735004 5448.635934 4.575394 6 6 6 110
PG07 -9991.808250 13570.849500 -20339.077994 407.766694 10 8 7 133
PG08 -15052.583665 -2964.607523 -21557.457010 16.117622 7 8 5 139
PG09 -18723.120409 8775.195156 -16675.301646 2.524101 7 7 7 116
PG10 -4164.114170 21669.017973 -14831.648909 -147.819059 7 3 6 103
PG11 -20609.249339 -5483.732752 15408.391287 -532.755529 7 6 5 113
PG12 19287.548372 -4125.847991 17609.200340 242.685388 7 8 6 106
PG13 -5336.093957 14024.683152 -22097.988754 -56.047704 8 6 4 102
PG14 1004.479007 -15283.967958 21943.724447 120.319545 6 4 3 91
PG15 26580.055807 2727.999508 789.709503 -211.761115 7 8 5 111
PG16 -10066.276767 -10610.365156 -22217.447180 -184.327592 8 5 7 113
PG17 -1940.184660 15048.015298 22076.037014 -134.339251 6 7 6 118
PG18 15642.336837 -21228.869126 1424.276221 354.973755 6 7 7 100
PG19 -25138.166956 -8848.104164 -3045.936003 -485.950435 9 9 6 114
PG20 -20086.385222 11191.360597 13035.952940 251.188608 8 7 7 125
PG21 5987.555228 -18963.799885 -16745.129386 -392.265206 8 7 5 131
PG22 5937.103032 -22627.370661 12637.495042 282.201427 7 6 5 131
PG23 -25423.940568 1463.836403 -8147.906560 -63.765440 9 9 6 108
PG24 16791.862121 3656.291310 20264.541771 -37.695093 5 8 5 111
PG25 19705.356601 -15996.189862 7509.299871 16.329456 7 6 7 94
PG26 20861.459071 13243.669082 -10760.187032 -106.511600 8 7 6 76
PG27 -19549.087599 -12402.698501 -13096.275126 26.238335 6 5 9 125
PG28 -11257.183242 21905.038988 10388.883379 394.977904 6 7 6 88
```

```

PG29 20352.063976 -6500.498081 -15728.657453 570.091507 8 8 7 129
PG30 -3259.824317 22682.855064 -13383.063540 -76.854699 7 4 4 112
PG31 -6092.859203 -25450.067891 3528.937843 329.773071 6 7 7 96
PG32 -16251.408166 -4376.257307 20438.665105 -305.293589 5 3 5 122
...

```

Abb. 151: Final Orbit Combination der GPS-Satelliten

B.10 Finale Ephemeriden der GPS-Satelliten

Die finalen Bahndaten der GPS-Satelliten für den 31.10.2014 sind im zweizeiligen TLE-Format angegeben. Die Reihenfolge entspricht der in Anhang B.11 aufgelisteten Satelliten.

Quelle: https://www.space-track.org/basicspacedata/query/class/tle_publish/PUBLISH_EPOCH/2014-10-31%2000:00:00--2014-11-01%2000:00:00/orderby/TLE_LINE1/format/tle

Datenformat: https://en.wikipedia.org/wiki/Two-line_element_set
https://de.wikipedia.org/wiki/Satellitenbahnelement#Das_Two_Line_Elements_Format_TLE

Formattransformation: [18, 140, 141]
<http://celestrak.com/NORAD/documentation/spacetrk.pdf>

```

1 37753U 11036A 14304.49927552 .00000078 00000-0 00000+0 0 9995
2 37753 055.0859 139.0594 0035512 022.0323 019.7183 02.00563508 24114
1 28474U 04045A 14303.64693459 .00000070 00000-0 00000+0 0 9991
2 28474 053.8581 137.2019 0140400 224.4194 162.0655 02.00559199 73235
1 22877U 93068A 14304.38872797 .00000074 00000-0 00000+0 0 9995
2 22877 053.8017 138.0645 0110371 061.8664 273.0638 02.00759269153977
1 35752U 09043A 14302.62373825 .00000006 00000-0 00000+0 0 9999
2 35752 054.2513 198.4998 0038654 018.5804 280.8464 02.00558488 38142
1 39741U 14026A 14303.06592337 .00000069 00000-0 00000+0 0 9997
2 39741 055.0802 138.6265 0004066 136.9544 223.1395 02.00569684 3328
1 32711U 08012A 14303.73906492 -.00000028 00000-0 10000-3 0 9991
2 32711 055.7058 320.1611 0080804 203.1751 156.4955 02.00571391 48598
1 25030U 97067A 14304.19735653 -.00000030 00000-0 00000+0 0 9993
2 25030 057.0511 326.0365 0148395 206.4150 158.3052 02.00738101124478
1 40105U 14045A 14304.15253630 -.00000015 00000-0 00000+0 0 9997
2 40105 054.9614 258.5621 0004233 232.0996 127.8721 02.00557158 1791
1 23953U 96041A 14304.38823573 -.00000007 00000-0 00000+0 0 9990
2 23953 053.9529 199.3642 0140441 050.6962 127.6461 02.00568045134053
1 25933U 99055A 14303.90588607 .00000065 00000-0 10000-3 0 9999
2 25933 051.0858 119.8627 0153972 077.3995 284.3568 02.00558107110390
1 29601U 06052A 14304.44042116 -.00000070 00000-0 00000+0 0 9992
2 29601 056.6472 021.1675 0048587 026.3922 284.1966 02.00550865 58277
1 24876U 97035A 14304.50026035 -.00000015 00000-0 00000+0 0 9990
2 24876 055.9263 264.9501 0056949 128.7152 084.5117 02.00303212126586
1 26605U 00071A 14304.24509532 -.00000013 00000-0 00000+0 0 9993
2 26605 055.4978 263.0657 0080753 247.6787 313.7415 02.00555342102364
1 32260U 07047A 14304.18197752 -.00000020 00000-0 00000+0 0 9995
2 32260 053.5840 256.3536 0067321 015.4063 233.5609 02.00548782 51660
1 27663U 03005A 14304.29539378 -.00000069 00000-0 00000+0 0 9995

```

```

2 27663 056.6799 022.2398 0076540 011.3555 054.6906 02.00562090 86127
1 28874U 05038A 14304.43338786 .00000027 00000-0 00000+0 0 9997
2 28874 055.5947 081.2258 0098778 240.9735 099.7695 02.00564065 66657
1 26690U 01004A 14304.17627904 -.00000005 00000-0 00000+0 0 9991
2 26690 053.0227 197.9411 0156771 245.3248 359.7356 02.00555006100766
1 28190U 04009A 14304.30470205 .00000033 00000-0 00000+0 0 9991
2 28190 055.4279 084.1127 0105616 028.0898 319.3355 02.00564468 77807
1 26360U 00025A 14304.51530275 -.00000003 00000-0 00000+0 0 9997
2 26360 053.0859 194.8959 0059695 075.8067 274.7767 02.00560089106097
1 27704U 03010A 14304.25924565 .00000072 00000-0 00000+0 0 9992
2 27704 053.4568 138.1031 0219087 246.5076 114.5415 02.00563747 84925
1 28129U 03058A 14304.23955642 -.00000006 00000-0 00000+0 0 9992
2 28129 052.8963 198.0291 0075004 242.6666 014.5612 02.00557623 79628
1 28361U 04023A 14304.26548301 -.00000018 00000-0 00000+0 0 9999
2 28361 054.4500 259.1604 0097890 205.2223 263.5911 02.00558917 75888
1 38833U 12053A 14303.92999708 -.00000029 00000-0 00000+0 0 9991
2 38833 054.7495 318.0149 0024249 006.2466 353.8182 02.00560377 15165
1 36585U 10022A 14303.05835108 -.00000064 00000-0 00000+0 0 9993
2 36585 055.9953 018.6888 0036147 037.5256 322.7381 02.00552472 32405
1 22014U 92039A 14304.10653193 -.00000011 00000-0 00000+0 0 9994
2 22014 055.7754 264.4266 0210800 073.9746 149.9881 02.00562284156978
1 39166U 13023A 14303.78289138 .00000023 00000-0 10000-3 0 9990
2 39166 055.2973 078.5876 0014527 010.8760 349.1530 02.00562888 10689
1 26407U 00040A 14304.38855995 -.00000069 00000-0 00000+0 0 9992
2 26407 056.5978 022.5574 0197854 262.5324 112.3642 02.00563029104768
1 32384U 07062A 14304.20357738 .00000029 00000-0 00000+0 0 9992
2 32384 055.6396 081.7614 0013108 304.9655 096.0446 02.00571308 50390
1 39533U 14008A 14304.27980042 -.00000034 00000-0 00000+0 0 9997
2 39533 054.8849 323.1330 0010711 196.3987 163.6065 02.00567199 5068
1 29486U 06042A 14304.19347262 -.00000028 00000-0 00000+0 0 9997
2 29486 055.9885 320.5333 0083393 323.0203 125.2738 02.00565300 59361
1 20959U 90103A 14303.98521997 -.00000009 00000-0 00000+0 0 9998
2 20959 054.2784 203.5352 0114231 356.1311 003.8412 02.00569136175259

```

Abb. 152: Finale Ephemeriden der GPS-Satelliten

B.11 GPS-Satelliten-Informationen

Da in den unterschiedlichen Institutionen und Themengebieten dieselben Satelliten durch unterschiedliche Bezeichnung benannt werden, sollen hier die häufigsten Bezeichnungen und grundlegenden Eigenschaften zusammengefasst werden. Die Daten wurden unter den angegebenen Quellen erhoben und in Tabelle 14 zusammengefasst. Die Daten beziehen sich auf die Konstellation am 31.10.2014, auf die sich auch die Szenarios aus Abschnitt 6.1 und 7.1.1. beziehen.

Quellen: <ftp://tycho.usno.navy.mil/pub/gps/gpsb2.txt>

<https://www.space-track.org>

Tabelle 14: GPS-Satelliten-Informationen

PRN	NAV-STAR	SVN	USA	NORAD	COSPAR	Plane	Start	LAUNCH
1	66	63	232	37753	2011-036A	D2	40740	IIF-2
2	56	61	180	28474	2004-045A	D1	38297	IIR-13
3	72	69	258	40294	2014-068A	B6	41941	IIF-8

4	35	34	96	22877	1993-068A	D6	34268	IIA-23
5	64	50	206	35752	2009-043A	E3	40042	IIR-21M
6	70	67	251	39741	2014-026A	D4	41776	IIF-6
7	62	48	201	32711	2008-012A	A4	39522	IIR-19M
8	44	38	135	25030	1997-067A			IIA-28
9	71	68	256	40105	2014-045A	F3	41853	IIF-7
10	38	40	126	23953	1996-041A			IIA-26
11	46	46	145	25933	1999-055A	D5	36440	IIR-3
12	59	58	192	29601	2006-052A	B4	39038	IIR-16M
13	43	43	132	24876	1997-035A	F6	35634	IIR-2
14	49	41	154	26605	2000-071A	F1	36840	IIR-6
15	60	55	196	32260	2007-047A	F2	39372	IIR-17M
16	51	56	166	27663	2003-005A	B1	37650	IIR-8
17	57	53	183	28874	2005-038A	C4	38621	IIR-14M
18	50	54	156	26690	2001-004A	E4	36921	IIR-7
19	54	59	177	28190	2004-009A	C3	38066	IIR-11
20	47	51	150	26360	2000-025A	E1	36657	IIR-4
21	52	45	168	27704	2003-010A	D3	37711	IIR-9
22	53	47	175	28129	2003-058A	E2	37976	IIR-10
23	55	60	178	28361	2004-023A	F4	38161	IIR-12
24	67	65	239	38833	2012-053A	A1	41186	IIF-3
25	65	62	213	36585	2010-022A	B2	40326	IIF-1
26	26	26	83	22014	1992-039A			IIA-14
27	68	66	242	39166	2013-023A	C2	41409	IIF-4
28	48	44	151	26407	2000-040A	B3	36723	IIR-5
29	61	57	199	32384	2007-062A	C1	39436	IIR-18M
30	69	64	248	39533	2014-008A	A3	41691	IIF-5
31	58	52	190	29486	2006-042A	A2	38985	IIR-15M
32	22	23	66	20959	1990-103A	E5	33203	IIA-10

C Ergänzungen und Details zu den Simulationsergebnissen in Abschnitt 7.3

Die in diesem Abschnitt zusammengefassten Tabellen ergänzen zur Vollständigkeit und Nachvollziehbarkeit die in Abschnitt 7.3 getroffenen Aussagen durch die detaillierte Darstellung der Eigenschaften aller betrachteten GPS-Satelliten.

C.1 Abweichung der Satellitenpositionen

In Tabelle 15 werden die Abweichung der gemessenen Satellitenposition aus Anhang B.9 und den zum selben Zeitpunkt in der Simulationsumgebung berechneten Satellitenposition im ECEF-Koordinatensystem verglichen. Da es sich bei den in der Simulationsumgebung verwendeten Bahndaten (Anhang B.8) um Broadcast-Ephemeriden handelt, sind Abweichungen gegenüber den finalen Messungen der Satellitenpositionen in Anhang B.9 zu erwarten. Die Ergebnisse aus Tabelle 15 werden in Abschnitt 7.3.1 kurz zusammengefasst.

Tabelle 15: Abweichung der GPS-Satellitenpositionen

PRN	SimU Weltraumsegment			Abweichungen			
	X (ECEF)	Y (ECEF)	Z (ECEF)	dx	dy	dz	abs
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
1	-15818092,240	97366,251	21307051,349	-1,065	-0,168	0,601	1,234
2	13910219,221	21922053,119	-6379526,224	-0,223	0,179	0,159	0,327
3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
4	-17187091,822	-5316781,082	19265556,338	-0,864	-1,588	0,005	1,807
5	11226584,360	10779661,348	-21564085,089	-0,661	0,633	0,040	0,916
6	5507815,570	25410733,865	5448635,369	0,487	1,139	0,565	1,361
7	-9991808,435	13570849,287	-20339077,983	0,185	0,213	-0,011	0,282
8	-15052583,331	-2964607,685	-21557456,348	-0,334	0,162	-0,662	0,759
9	-18723119,035	8775194,900	-16675301,179	-1,374	0,256	-0,467	1,474
10	-4164115,222	21669017,473	-14831647,471	1,052	0,500	-1,438	1,851
11	-20609247,818	-5483732,345	15408390,634	-1,521	-0,407	0,653	1,704
12	19287548,184	-4125847,783	17609200,718	0,188	-0,208	-0,378	0,471
13	-5336092,335	14024682,727	-22097987,386	-1,622	0,425	-1,368	2,163
14	1004479,443	-15283967,413	21943722,855	-0,436	-0,545	1,592	1,739
15	26580055,880	2727999,459	789709,020	-0,073	0,049	0,483	0,491
16	-10066275,526	-10610365,716	-22217445,538	-1,241	0,560	-1,642	2,133
17	-1940185,033	15048015,194	22076037,138	0,373	0,104	-0,124	0,406
18	15642334,698	-21228868,961	1424277,217	2,139	-0,165	-0,996	2,366
19	-25138166,982	-8848103,834	-3045936,175	0,026	-0,330	0,172	0,373
20	-20086383,665	11191359,901	13035952,588	-1,557	0,696	0,352	1,742
21	5987554,421	-18963799,066	-16745128,215	0,807	-0,819	-1,171	1,642
22	5937102,971	-22627370,826	12637494,855	0,061	0,165	0,187	0,257
23	-25423940,652	1463836,338	-8147906,310	0,084	0,065	-0,250	0,272
24	16791861,601	3656290,554	20264540,882	0,520	0,756	0,889	1,278
25	19705355,606	-15996189,996	7509299,313	0,995	0,134	0,558	1,148

26	20861458,405	13243668,467	-10760186,502	0,666	0,615	-0,530	1,050
27	-19549086,452	-12402698,060	-13096274,865	-1,147	-0,441	-0,261	1,256
28	-11257180,873	21905038,049	10388884,599	-2,369	0,939	-1,220	2,825
29	20352065,924	-6500495,709	-15728656,034	-1,948	-2,372	-1,419	3,381
30	-3259825,319	22682853,466	-13383063,469	1,002	1,598	-0,071	1,888
31	-6092859,357	-25450067,902	3528937,171	0,154	0,011	0,672	0,690
32	-16251407,086	-4376257,929	20438664,782	-1,080	0,622	0,323	1,288

C.2 Änderung der Satellitenposition während der Signallaufzeit

Nach Abschnitt 5.13.2.1 ändert sich die effektive Satellitenposition im ECEF-Koordinatensystem durch die Erdrotation während der Signallaufzeit zwischen GNSS-Satellit und dem Empfänger. In Tabelle 16 ist der Einfluss auf die Satellitenposition für das Szenario aus Abschnitt 7.1.1 und anhand der exemplarischen

Antennenposition $p_{GNSS4}^e = \begin{pmatrix} 3988512,471 \\ 433771,726 \\ 4941625,813 \end{pmatrix}$ dargestellt. Die grauen Zeilen sind

Satelliten, die in dieser Empfängerposition nicht sichtbar sind. In Abschnitt 7.3.2 wird eine kurze Zusammenfassung der Tabelle 16 gegeben.

Die Spalte „Signallaufzeit“ enthält die berechnete Zeitspanne zwischen dem Sendezeitpunkt am GPS-Satelliten zum Empfangszeitpunkt am GPS-Empfänger. In den Spalten dX, dY, dZ sind die durch die Drehung des erdfesten ECEF-Koordinatensystems verursachten Veränderungen der Satellitenposition in ECEF-Koordinaten dargestellt. Die Spalte „abs“ beschreibt die Vektorlänge der Satellitenpositionsänderung. In der Spalte „Abweichung TrueRange“ wird der Einfluss dieses Effektes auf die vom GPS-Empfänger berechneten wahren Abstände zwischen GPS-Empfänger und GPS-Satelliten dargestellt.

Tabelle 16: Positionsabweichung von GPS-Satelliten durch die Erdrotation während der Signallaufzeit von Satellit zum Empfänger

PRN	Signal- laufzeit	Positionsabweichung durch Rotation				neuer TrueRange	Abweichung TrueRange
		dX (ECEF)	dY (ECEF)	dZ (ECEF)	abs		
	[ms]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
1	85,710	0,608	98,864	0	98,866	25695174,7	-1,763
2	87,516	139,901	-88,771	0	165,688	26236539,9	-19,800
3	81,354	-134,235	-35,222	0	138,779	24389313,2	22,579
4	87,407	-33,889	109,548	0	114,670	26204005,1	3,345
5	97,933	76,982	-80,173	0	111,148	29359502,2	-9,274

6	83,485	154,697	-33,530	0	158,289	25028287,7	-24,071
7	105,858	104,757	77,130	0	130,089	31735580,5	-14,220
8	109,433	-23,658	120,119	0	122,427	32807218,5	1,288
9	108,225	69,253	147,762	0	163,185	32445180,8	-10,489
10	100,534	158,857	30,528	0	161,764	30139419,9	-21,462
11	91,327	-36,520	137,251	0	142,027	27379183,0	3,146
12	67,978	-20,452	-95,609	0	97,772	20379348,2	6,038
13	105,630	108,027	41,102	0	115,582	31667060,1	-14,169
14	77,873	-86,791	-5,704	0	86,979	23345714,5	14,934
15	77,001	15,318	-149,246	0	150,030	23084187,7	0,158
16	108,453	-83,913	79,609	0	115,667	32513452,5	9,232
17	77,679	85,239	10,990	0	85,944	23287642,8	-14,804
18	82,886	-128,310	-94,545	0	159,381	24848585,7	22,246
19	105,393	-68,002	193,197	0	204,815	31596161,8	5,932
20	92,008	75,086	134,767	0	154,273	27583422,0	-12,977
21	97,283	-134,529	-42,476	0	141,075	29164638,0	19,030
22	81,354	-134,235	-35,222	0	138,779	24389313,2	22,579
23	107,441	11,468	199,190	0	199,520	32210084,6	-4,103
24	67,468	17,988	-82,613	0	84,549	20226274,4	-1,776
25	76,324	-89,029	-109,673	0	141,259	22881323,0	17,598
26	87,958	84,946	-133,806	0	158,492	26369247,8	-10,647
27	107,786	-97,484	153,653	0	181,968	32313445,1	9,970
28	89,698	143,278	73,633	0	161,092	26890895,8	-22,439
29	90,930	-43,102	-134,949	0	141,665	27260044,7	8,454
30	99,140	163,983	23,567	0	165,667	29721298,8	-22,350
31	92,777	-172,179	41,220	0	177,045	27813693,8	24,048
32	86,531	-27,614	102,545	0	106,198	25941257,0	2,531

C.3 Einfluss der Uhrenabweichung von GPS-Satelliten

In Abschnitt 5.13.1.1 wird eine systematische Störung eines GNSS-Satellitensignals durch eine Zeitabweichung der Satellitenuhr eingeführt. Zur Darstellung dieses Effektes wurde die Uhrenabweichung aus den Ephemeridendaten in Anhang B.8 zum Zeitpunkt 31.10.2014 2:00:00 Uhr berechnet und in Tabelle 17 aufbereitet. In der Spalte „delta_t_sv“ (Δt_{sv}) ist die Uhrzeitabweichung der Satelliten in Millisekunden dargestellt. In der Spalte „s_delta_t_sv“ ($s_{\Delta t_{sv,i}}$) ist der sich aus Formel (54) ergebende (erhebliche) systematische Messfehler dargestellt.

Tabelle 17: Einfluss der Uhrenabweichung von GPS-Satelliten

PRN	neuer TrueRange	delta t_sv	Distanz s_delta_t_sv	Pseudo- abstand PR1
	[m]	[ms]	[m]	[m]
1	25695174,7	-0,012451	-3732,831	25691441,860
2	26236539,9	0,528226	158358,110	26394897,982
3	24389313,2	0,283819	85086,743	24474399,971
4	26204005,1	-0,002549	-764,065	26203241,072
5	29359502,2	-0,321654	-96429,395	29263072,844
6	25028287,7	0,006385	1914,108	25030201,768
7	31735580,5	0,409478	122758,327	31858338,777
8	32807218,5	0,016179	4850,208	32812068,666
9	32445180,8	-0,000209	-62,611	32445118,225
10	30139419,9	-0,148498	-44518,596	30094901,277
11	27379183,0	-0,533995	-160087,558	27219095,397
12	20379348,2	0,243897	73118,566	20452466,732
13	31667060,1	-0,057585	-17263,437	31649796,674
14	23345714,5	0,118734	35595,479	23381309,931
15	23084187,7	-0,212746	-63779,645	23020408,022
16	32513452,5	-0,183120	-54897,902	32458554,604
17	23287642,8	-0,135474	-40613,943	23247028,856
18	24848585,7	0,356133	106765,910	24955351,577
19	31596161,8	-0,486686	-145904,818	31450257,000
20	27583422,0	0,253048	75862,016	27659284,015
21	29164638,0	-0,393151	-117863,806	29046774,228
22	24389313,2	0,283819	85086,743	24474399,971
23	32210084,6	-0,065001	-19486,825	32190597,736
24	20226274,4	-0,037930	-11371,144	20214903,216
25	22881323,0	0,015643	4689,618	22886012,618
26	26369247,8	-0,112187	-33632,692	26335615,126
27	32313445,1	0,027499	8243,996	32321689,128
28	26890895,8	0,396141	118760,212	27009656,034
29	27260044,7	0,571156	171228,203	27431272,907
30	29721298,8	-0,078141	-23426,138	29697872,704
31	27813693,8	0,329536	98792,500	27912486,310
32	25941257,0	-0,301382	-90352,113	25850904,882

C.4 Gauß-Newton-Verfahren (Ausgleichsrechnung) zur GNSS-Positionsschätzung

C.4.1 Einleitung und Anwendung der Sensorfusion

Im Rahmen der Messdatenauswertung auf dem Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ werden Auswertemethoden entwickelt, die Sensorsignale mit gleicher Messgröße, z.B. Distanz oder Geschwindigkeit verschiedener Sensoren zusammenfassen. Um die vorhandene Dynamik der Sensorsignale nicht zu verändern wird jeder Messzeitpunkt selektiv verarbeitet. So werden Effekte von umliegenden Messzeitpunkten nicht in einem Signal „verschliffen“. Die einfachsten mathematischen Verfahren sind Mittelwertbildung, Medianfilter oder statistische Auswertung für die Sensorsignale zu einem Messzeitpunkt. Bei diesen Verfahren werden jedoch nur „Zahlen“ zusammengefasst. Die mathematischen Modelle gehen von einer Gleichwertigkeit der Signale aus. Für redundante eindimensionale Sensordaten sind diese Verfahren meist ausreichend.

Bei Sensordaten mit nur einem indirekten Zusammenhang, z.B. die Sensorgrößen Distanz, Geschwindigkeit und Beschleunigung, müssen erweiterte Verfahren eingesetzt werden. Das Gebiet der Sensordatenfusion ist sehr groß und wird für sehr unterschiedliche Anwendungen eingesetzt. Allen gemeinsam ist, dass es ein mathematisches Modell gibt, das den Zusammenhang der Sensorsignale beschreibt. Die aus der Fusion der Sensorsignale entstehende Überbestimmtheit kann für verschiedene Zwecke genutzt werden.

In hochverfügbare Anwendungen können sich die Sensoren gegenseitig ersetzen. Das fehlerhafte Signal oder der Ausfall eines Sensors kann durch eine Sensorfusion, die das Sensorsignal mit anderen Sensoren vergleicht, erkannt werden. Die Sensorfusion kann das Sensorsignal durch die redundanten Sensoren aktiv halten.

Wenn für ein Sicherheitsniveau ein einzelner Sensor nicht ausreichend ist, dann kann eine Sensorfusion aus verschiedenen komplementären Sensoren das Sicherheitsniveau und die Verfügbarkeit steigern. Dies ist bei sicherheitsrelevanten Anwendungen im Schienenfahrzeugbereich anzutreffen, z.B. in Zugsicherungssystemen. Für sicherheitsrelevante Systeme wird häufig gefordert, dass die Systeme ihren Zustand und das Genauigkeits- und Sicherheitsniveau selbst bestimmen. Durch eine Sensorfusion kann aus dem Vergleich der Sensoren und deren zeitlichem Verlauf ein Konfidenzintervall berechnet werden.

Das Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ hat eine Vielzahl von Bewegungssensoren, die unterschiedliche Sensorsignale mit unterschiedlicher Genauigkeit und

Qualität erzeugen. Für den praktischen Versuchsbetrieb ist es wichtig, dass der Ausfall eines (der vielen) Sensoren die Testfahrt und die Messdatenauswertung nicht negativ beeinflusst.

Für wissenschaftliche Anwendungen ist die Fusion von Sensorsignalen interessant, z.B. die Fahrzeuggeschwindigkeit als ein möglichst genaues Signal mit hoher Signalqualität. Mit konventioneller Sensorik und in Kombination mit Absolutpositionen und Richtungsvektoren wurde dies in den vom Autor betreuten Abschlussarbeiten von Dering [163] und Dollmann [164] untersucht.

C.4.2 Validierung des GNSS-Modells der Simulationsumgebung

Diese Arbeit stellt in Abschnitt 5.13 die funktionale Simulation eines Satellitennavigationssystems vor. Darin werden das GNSS-Weltraumsegment (die GNSS-Satelliten) und das GNSS-Benutzersegment (der GNSS-Empfänger) separat modelliert und miteinander gekoppelt.

Die Position der GNSS-Satelliten ist aus den Satelliten-Bahndaten (Ephemeriden) bekannt. Die ideale GNSS-Satellit-Empfänger-Distanzmessung wird als „Truerange“ bezeichnet und lassen sich in der Simulationsumgebung aus den idealen Positionen von GNSS-Empfänger und GNSS-Satellit berechnen. Auf die ideale Entfernung zwischen GNSS-Satellit und GNSS-Empfänger werden in der Simulationsumgebung die systematischen und stochastischen Störungen aufgeprägt und das in Realität durch den GNSS-Empfänger messbare Pseudorange-Laufzeit- bzw. Distanzsignal erzeugt.

Es sei darauf hingewiesen, dass in einem GNSS-Empfänger eine Vielzahl an Messdaten für die Positionsbestimmung und deren Verbesserung genutzt werden. Darauf soll hier nicht weiter eingegangen werden. In einer realen Messanordnung wird der wahre Abstand (Truerange) als Ergebnis eines aufwendigen Kompensierungs- und Schätzprozesses im GNSS-Empfänger erzeugt.

Um die in der Simulationsumgebung erzeugten idealen Abstandssignale zwischen GNSS-Satellit und GNSS-Empfänger (Truerange) auf Berechnungsfehler prüfen zu können, wird ein Algorithmus benötigt, der aus den idealen Abstandssignalen (und den Positionen der GNSS-Satelliten) wieder die Position des GNSS-Empfängers berechnet. Der Abstand zwischen der vorgegebenen Position des GNSS-Empfängers und der aus den wahren Abständen berechneten Position dient hier als Qualitätskriterium. Als mathematisches Verfahren zur Positionsbestimmung des GNSS-Empfängers aus den Positionen der GNSS-Satelliten und den virtuellen Abstandsmessungen wird das Gauß-Newton-Verfahren gewählt. Es weist gegenüber dem Kalman-Filter für diesen Anwendungsfall den Vorteil auf, dass sich die Berechnung nur auf einen Zeitpunkt bezieht. Die allgemeine Berechnungsschema wird aus dem

Buch „Ausgleichsrechnung“ von Niemeier [20] angewendet. Das Berechnungsmodell und der GNSS-Bezug werden von Farrell [22] übernommen.

C.4.3 Algorithmus der GNSS-Positionsschätzung

Für einen Zeitpunkt liegen i Satellitenpositionen \tilde{p}^i als dreidimensionale Vektoren im ECEF-Koordinatensystem vor. Die Satellitenpositionen werden aus den Bahndaten (Ephemeriden) nach Abschnitt 5.13.1 berechnet:

$$\tilde{p}^i = \begin{pmatrix} \tilde{p}_x^i \\ \tilde{p}_y^i \\ \tilde{p}_z^i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{x}^i \\ \tilde{y}^i \\ \tilde{z}^i \end{pmatrix} [m]^3 \quad (59)$$

Der Vektor der gemessenen Beobachtungen L_{gem} wird nun aus den vom GNSS-Empfänger gemessenen Distanzwerten zu den Satelliten ρ^i zusammengestellt:

$$L_{gem} = \tilde{\rho} = \begin{pmatrix} \tilde{\rho}^1 \\ \tilde{\rho}^2 \\ \vdots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} [m] \\ [m] \\ \vdots \end{pmatrix} \quad (60)$$

Gesucht ist die geschätzte Empfängerposition \hat{p}^R aus den Satellitenpositionen und den gemessenen Distanzwerten. In der Simulationsumgebung liegt die Position des GNSS-Empfängers \vec{p}^R als dreidimensionaler Vektor im ECEF-Koordinatensystem bereits vor:

$$\hat{p}^R = \begin{pmatrix} \hat{p}_x^R \\ \hat{p}_y^R \\ \hat{p}_z^R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{x}^R \\ \hat{y}^R \\ \hat{z}^R \end{pmatrix} [m]^3 \quad (61)$$

Es wird ein idealer geometrischer Abstand R^i zwischen einer idealen Empfängerposition \vec{p}^R und einer idealen Satellitenposition \vec{p}^i definiert:

$$R^i = R(p^R, p^i) = |\vec{p}^R - \vec{p}^i| [m] \quad (62)$$

Darauf aufbauend wird ein geschätzter geometrischer Abstand \hat{R}^i zwischen der geschätzten Empfängerposition \hat{p}^R und einer berechneten Satellitenposition \tilde{p}^i definiert. Dies entspricht einer korrigierten oder idealen Abstandsmessung des GNSS-Empfängers (Truerange):

$$\hat{R}^i = R(\hat{p}^R, \tilde{p}^i) = |\hat{p}^R - \tilde{p}^i| [m] \quad (63)$$

Die Uhrzeitabweichung des GNSS-Empfängers Δt_R von der Uhrzeit des GNSS-Systems wirkt sich als Distanzabweichung Δs_R auf alle Abstandsmessungen zwischen

GNSS-Satellit und GNSS-Empfänger gleich aus. Die elektromagnetische Welle des Satellitensignals bewegt sich mit Lichtgeschwindigkeit c fort:

$$\Delta s_R = c \cdot \Delta t_R \quad [m] \quad (64)$$

Der nun vom GNSS-Empfänger quasi messbare Distanzwert (ohne weitere Störungen, z.B. Atmosphärenstörungen) für den i -ten Satelliten wird hier mit ρ^i (Pseudorange) bezeichnet:

$$\rho^i = R^i + \Delta s_R \quad [m] \quad (65)$$

Im weiteren Verfahren kann aus einem geschätzten geometrischen Abstand \hat{R}^i und einer geschätzten Distanzabweichung $\Delta \hat{s}_R$ ein geschätzter Abstandswert für den i -ten Satelliten $\hat{\rho}^i$ berechnet werden:

$$\hat{\rho}^i = \hat{R}^i + \Delta \hat{s}_R \quad [m] \quad (66)$$

Aus dem gemessenen Abstandswert für den i -ten Satelliten $\tilde{\rho}^i$ und einer geschätzten Distanzabweichung $\Delta \hat{s}_R$ des GNSS-Empfängers kann ein geschätzter geometrischer Abstand \hat{R}^i zurück gerechnet werden:

$$\hat{R}^i = \tilde{\rho}^i - \Delta \hat{s}_R \quad [m] \quad (67)$$

Gesucht sind die Empfängerposition $\vec{p}^R = (x_e \ y_e \ z_e)^T$ im ECEF-Koordinatensystem und die Uhrzeitabweichung des GNSS-Empfängers Δt_R . Hierfür wird folgender Parametervektor definiert:

$$\hat{X} = (\hat{x}^R \ \hat{y}^R \ \hat{z}^R \ \Delta s_R)^T \quad [m]^4 \quad (68)$$

Im gleichen Format ist der Ergebnisvektor \hat{Y} definiert.

Im ersten Iterationsschritt wird der Parametervektor zu null gesetzt. So werden keine Zusatzinformationen aus anderen Zeitschritten verwendet:

$$\hat{X}_0 = (0 \ 0 \ 0 \ 0)^T \quad [m]^4 \quad (69)$$

Ab hier beginnt ein (der k -te) Iterationsprozess. Aus dem vorherigen Iterationsschritt $k-1$ wird der Ergebnisvektor \hat{Y}_{k-1} als neuer Parametervektor \hat{X}_k übernommen:

$$\begin{aligned} \hat{X}_k &= \hat{Y}_{k-1} \quad \text{für } k > 1 \\ \hat{X}_k &= \hat{X}_0 \quad \text{für } k = 1 \end{aligned} \quad (70)$$

Die geschätzte Empfängerposition ergibt sich aus den ersten drei Zeilen des Parametervektors \hat{X}_k :

$$\hat{p}_{k-1}^R = \hat{X}_k(1:3) = \begin{pmatrix} p_{x,k-1}^R \\ p_{y,k-1}^R \\ p_{z,k-1}^R \end{pmatrix} [m]^3 \quad (71)$$

Aus der geschätzten Empfängerposition \hat{p}_{k-1}^R des vorangegangenen Iterationsschrittes $k-1$ wird eine Satellit-Empfänger-Entfernung \hat{R}_k^i für den aktuellen Iterationsschritt geschätzt:

$$\begin{aligned} \hat{R}_k^i &= R(\hat{p}_{k-1}^R, \tilde{p}^i) = |\hat{p}_{k-1}^R - \tilde{p}^i| [m] \\ &= \sqrt{(x_{k-1}^R - \tilde{x}^i)^2 + (y_{k-1}^R - \tilde{y}^i)^2 + (z_{k-1}^R - \tilde{z}^i)^2} \\ &\quad [m] \end{aligned} \quad (72)$$

Die berechneten Beobachtungen des aktuellen Iterationsschrittes ergeben sich aus den geschätzten Satellit-Empfänger-Entfernungen \hat{R}_k^i und dem Empfänger-Uhrzeitfehler des vorherigen Iterationsschrittes $k-1$. Dies entspricht den berechneten Beobachtungen L_{ber} und ist das mathematische Funktionsmodell.

$$L_{ber,k}^i = f(\hat{X}) = \rho_k^i(\hat{R}_{k-1}^i, \hat{X}(4)) = \hat{R}_{k-1}^i + \hat{X}(4) [m] \quad (73)$$

Die partiellen Ableitungen des Funktionsmodells werden zur Vollständigkeit hier dokumentiert:

$$\left(\frac{\partial f^i}{\partial x} \right) = \left(\frac{\partial f^i}{\partial \hat{X}(1)} \right) = \frac{x_{k-1}^R - \tilde{x}^i}{\hat{R}_k^i} = \frac{\hat{X}(1) - \tilde{x}^i}{\hat{R}_k^i} \quad (74)$$

$$\left(\frac{\partial f^i}{\partial y} \right) = \left(\frac{\partial f^i}{\partial \hat{X}(2)} \right) = \frac{y_{k-1}^R - \tilde{y}^i}{\hat{R}_k^i} = \frac{\hat{X}(2) - \tilde{y}^i}{\hat{R}_k^i} \quad (75)$$

$$\left(\frac{\partial f^i}{\partial z} \right) = \left(\frac{\partial f^i}{\partial \hat{X}(3)} \right) = \frac{z_{k-1}^R - \tilde{z}^i}{\hat{R}_k^i} = \frac{\hat{X}(3) - \tilde{z}^i}{\hat{R}_k^i} \quad (76)$$

$$\left(\frac{\partial f^i}{\partial (\Delta s_R)} \right) = \left(\frac{\partial f^i}{\partial \hat{X}(4)} \right) = 1 \quad (77)$$

Die Designmatrix \mathbf{A} ergibt sich aus den partiellen Ableitungen des Funktionsmodells:

$$\mathbf{A} = \nabla f(\hat{\mathbf{X}}) = \begin{pmatrix} \frac{\hat{X}(1) - \tilde{x}^1}{\hat{R}_k^1} & \frac{\hat{X}(2) - \tilde{y}^1}{\hat{R}_k^1} & \frac{\hat{X}(3) - \tilde{z}^1}{\hat{R}_k^1} & 1 \\ \frac{\hat{X}(1) - \tilde{x}^2}{\hat{R}_k^2} & \frac{\hat{X}(2) - \tilde{y}^2}{\hat{R}_k^2} & \frac{\hat{X}(3) - \tilde{z}^2}{\hat{R}_k^2} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix} \quad (78)$$

Aus der Differenz zwischen den gemessenen Beobachtungen $L_{gem} = \tilde{\rho}$ und den berechneten Beobachtungen $L_{ber,k}$ ergibt sich der verkürzte Beobachtungsvektor $\hat{\mathbf{l}}$:

$$\hat{\mathbf{l}} = L_{gem} - L_{ber,k} \quad (79)$$

Mit dem verkürzten Beobachtungsvektor $\hat{\mathbf{l}}$ berechnet sich der verkürzte Unbekanntenvektor $\hat{\mathbf{d}}\mathbf{x}$ für diesen Iterationsschritt durch die Methode der kleinsten Fehlerquadrate. Die Gewichtsmatrix \mathbf{P} kann vereinfacht als Einheitsmatrix angenommen werden:

$$\hat{\mathbf{d}}\mathbf{x} = (\mathbf{A}' \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}' \mathbf{P} \hat{\mathbf{l}} \quad (80)$$

Der Ausgabevektor $\hat{\mathbf{Y}}_k$ für diesen k -ten Iterationsschritt ergibt sich als (nicht verkürzter) Ergebnisvektor:

$$\hat{\mathbf{Y}}_k = \hat{\mathbf{X}} + \hat{\mathbf{d}}\mathbf{x} \quad (81)$$

Die geschätzte Empfängerposition $\hat{\mathbf{p}}_k^R$ im k -ten Iterationsschritt ergibt sich aus den ersten drei Zeilen des Ergebnisvektors:

$$\hat{\mathbf{p}}_k^R = \begin{pmatrix} \hat{p}_{x,k}^R \\ \hat{p}_{y,k}^R \\ \hat{p}_{z,k}^R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{x}_k^R \\ \hat{y}_k^R \\ \hat{z}_k^R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{Y}_k(1) \\ \hat{Y}_k(2) \\ \hat{Y}_k(3) \end{pmatrix} [m]^3 \quad (82)$$

Die Uhrzeitabweichung des GNSS-Empfängers Δt_R von der Uhrzeit des GNSS-Systems und die sich daraus ergebende Distanzabweichung Δs_R auf alle Distanzmessungen zwischen GNSS-Satellit und GNSS-Empfänger sind nach dem k -ten Iterationsschritt:

$$\Delta s_{R,k} = \hat{Y}_k(4) = c \cdot \Delta t_{R,k} [m] \quad (83)$$

Die Iteration wird in der hier genutzten Anwendung nach 20 Iterationsschritten abgebrochen. Niemeier [20] beschreibt weitere statistische Auswertungen und Proben dieses Berechnungsverfahrens.

D Ergänzende Kapitel zur Simulationsumgebung

In diesem Kapitel werden zusätzliche Themen zusammengefasst, die interessante Aspekte der Simulationsumgebung beschreiben. Im ersten Abschnitt wird die FMEA kurz vorgestellt, die als Datengrundlage für Fehlersituationen der Sensormodelle dient. Der zweite Abschnitt fasst die konkreten Berechnungen der Koordinatentransformationen zwischen den hier verwendeten Koordinatensystemen zusammen.

D.1 Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA)

In Abb. 153 ist ein Ausschnitt aus der Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA) von Sensoren und Steuergeräten auf dem Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ dargestellt. Die Struktur entspricht einer Konstruktions-FMEA. Die FMEA wurde im Rahmen der Entwicklung der Simulationsumgebung im Projekt SiPoS-Rail angefertigt, um einen systematischen Überblick über die bekannten Fehlfunktionen, deren Auswirkung auf die Messanordnung und die zu dieser Fehlfunktion führenden Ursachen zu erlangen. In Kapitel 5 werden die Erkenntnisse aus der FMEA genutzt, um Fehlermodelle zu beschreiben. In Kapitel 7 werden Ausfallszenarien konstruiert, die als mögliche Fehlfunktionen in der FMEA beschrieben sind.

Innerhalb der FMEA wird ein Nummernsystem verwendet, um jede Zeile eindeutig zu benennen. Die erste Zahl beschreibt das System. Die zweite Zahl beschreibt die Eigenschaft des Systems. Die beiden ersten Zahlen werden in der Spalte „Sensor Nr.“ geführt. Für die erkannten Fehlfunktionen des Systems wird eine dritte Zahl (Spalte: Fehler Nr.) eingeführt. Jeder Fehlfunktion werden in einer vierten Zahl (Spalte: Ursache Nr.) die möglichen Ursachen, die zu dieser Fehlfunktion führen könnte, zugeordnet. Die vier Zahlen können durch Punkte getrennt als Pfadangabe (z.B. 1.2.2.3, hier Zeile 41) verwendet werden. Aus der Kombination der vier Zahlen ist jede Zeile der FMEA eindeutig erreichbar.

SPoS_FMEA_130607_RS.xlsx - Microsoft Excel												
Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse												
Konstruktions-FMEA												
Sensor Nr.	System	Merkmal	FehlerNr	Potentielle Fehler	Potentielle Folgen des Fehlers	Ursache Nr.	Potentielle Fehlerursachen	vorgesehene Prüfmaßnahmen	Auftreten	Bedenkung	Risiko-Prioritätszahl (RPZ)	Derzeitiger Zustand
1												
2												
3												
4												
5												
6												
28	1,1		5		Fehlendes Sensorsignal wird weiterverarbeitet		falsche Baudrate erzeugt Zufallszahlen				0	
29	1,1		5		Fehlendes Sensorsignal wird weiterverarbeitet		Lagefehler der Gyro nicht rausgerechnet				0	
30	1,1		5		Fehlendes Sensorsignal wird weiterverarbeitet		Falsche Nullage durch längere Kurvenfahrt wegen Zentrifugalbeschleunigung				0	
31	Inertial Measurement Unit (IMU)	Beschleunigung Sensor	1	Sensor sendet kein Signal mehr	Ausfall des Sensorsignals		Allgemeiner Ausfall des Sensors Sensor ist passiv				0	
32	1,2		1		Ausfall des Sensorsignals		Neustart des Sensors	Increment ErrorCounter ErrorCounter<max Test auf erlaubte Ausfallzeit			0	
33	1,2		1		Ausfall des Sensorsignals		Sensor befindet sich im permanenten Neustart	quercheck Beschl.			0	
34	1,2		1		Ausfall des Sensorsignals		Kabel gebrochen oder Stecker ab				0	
35	1,2		1		Ausfall des Sensorsignals		Sensor hat keine Spannungsversorgung				0	
36	1,2		1		Ausfall des Sensorsignals		Anschlussklemmen haben sich gelöst und Kabel ist ab				0	
37	1,2		1		Ausfall des Sensorsignals		Durch Korrosion steigt der Übergangswiderstand an den Anschlussklemmen und an den Steckverbindern bis der Signalpegel unter den zulässigen Bereich fällt				0	
38	1,2		1		Ausfall des Sensorsignals		Sensor ist abgestürzt				0	
39	1,2		2	stehenbleiben des Wertesatzes	Fehlinterpretation des falschen Signals		Die Schrittschleife sendet den letzten Wert aus.				0	
40	1,2		2		Ausfall des Sensorsignals		am Steuergerät werden keine neuen Signale mehr empfangen und die letzte Messung wird nur wiederholt				0	
41	1,2		2		Ausfall des Sensorsignals		Sensor befindet sich im permanenten Neustart				0	
42	1,2		2		Ausfall des Sensorsignals		Kabel gebrochen oder Stecker ab				0	

Abb. 153: FMEA des Sensor-Fehler-Moduls als MS-Excel-Tabelle

D.2 Koordinatentransformationen zwischen Koordinatensystemen

Ein zentrales Element des Umgebungsmodells in der Simulationsumgebung ist der Bezug aller Positionen auf das ECEF-Koordinatensystem. In diesem Abschnitt werden mit den Methoden der Vektorrechnung und Kinematik die konkreten mathematischen Formulierungen dokumentiert, mit denen die Positionen in der Simulationsumgebung zwischen den verschiedenen Koordinatensystemen umgerechnet werden. Zur anschaulichen Beschreibung wurden hier Richtungskosinusmatrizen (Anhang D.2.1) für die Beschreibung der Koordinatentransformationen in kartesischen Koordinatensystemen genutzt.

D.2.1 Richtungskosinusmatrizen für ebene Drehungen

Zur eleganteren Darstellung der in den nachfolgenden Abschnitten behandelten Koordinatensystemtransformationen werden hier drei standardisierte Richtungskosinusmatrizen zur ebenen Drehung um die drei Raumachsen eingeführt.

Ebene Rotation um die X-Achse mit dem Winkel α :

$$\mathbf{R}_X(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix} \quad (84)$$

Ebene Drehung um die Y-Achse mit dem Winkel β :

$$\mathbf{R}_Y(\beta) = \begin{pmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{pmatrix} \quad (85)$$

Ebene Drehung um die Z-Achse mit dem Winkel γ :

$$\mathbf{R}_Z(\gamma) = \begin{pmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & 0 \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (86)$$

Die Drehung ist mathematisch positiv (Rechte-Hand-Regel) definiert.

D.2.2 Transformation ECEF→LLA

Die Abkürzung LLA beschreibt die sphärische, auf einen Referenzellipsoiden bezogene Koordinatenangabe des Längengrades (engl: Longitude), des Breitengrades (engl: Latitude) und der Höhe über dem Referenzellipsoiden (engl: Altitude). Im WGS-Datum ist die Reihenfolge definiert, sie wird jedoch in vielen Veröffentlichungen abweichend verwendet. Um die Unschärfe der Abkürzung zu umgehen, wurde in der hier beschriebenen Software aus den deutschen Bezeichnungen die Koordinatenangabe

BLH (für Breitengrad, Längengrad, Höhe) oder LBH (für Längengrad, Breitengrad, Höhe) gebildet und verwendet.

Die Transformation einer Position aus dem ECEF-Koordinatensystem in die sphärische Darstellung der Position (auf den Referenzellipsoiden des WGS84-Datums bezogen) lässt sich folgendermaßen berechnen:

Gegeben: Position: $P_{ECEF} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$

Exzentrizität des WGS84-Referenzellipsoids: e

Große und kleine Halbachse des WGS84-Referenzellipsoids: a, b

Gesucht: $P_{LLA} = \begin{pmatrix} B \\ L \\ H \end{pmatrix}$

Der Längengrad ist direkt zu bestimmen:

$$L = \tan^{-1} \left(\frac{Y}{X} \right) \quad [rad] \quad (87)$$

Mit einer Hilfsgröße p :

$$p = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (88)$$

bestimmt man den Breitengrad durch ein Iterationsverfahren. Als Startwert für die Iteration ($k = 0$) wird ein angenäherter Breitengrad B_0 berechnet:

$$B_0 = \frac{Z}{p(1 - e^2)} \quad (89)$$

Als erster Berechnungsschritt wird die Hilfsgröße N_{k+1} der Iteration erzeugt:

$$N_{k+1} = \frac{a^2}{\sqrt{a^2 \cos^2(B_k) + b^2 \sin^2(B_k)}} \quad (90)$$

Die geodätische Höhe über dem WGS84-Referenzellipsoiden ergibt sich zu:

$$H_{k+1} = \frac{p}{\cos(B_k)} - N_{k+1} \quad [m] \quad (91)$$

Der geografische Breitengrad B_{k+1} ergibt sich als letzten Schritt der Iteration:

$$B_{k+1} = \tan^{-1} \left(\frac{Z}{p \left(1 - e^2 \frac{N_{k+1}}{N_{k+1} + H_{k+1}} \right)} \right) \quad [rad] \quad (92)$$

Ist die Abbruchbedingung erfüllt (hier: $k > 10$), werden die im letzten Iterationsschritt bestimmten finalen Werte für Höhe und Breitengrad ausgegeben.

Rücktransformation LLA→ECEF

Aus dem Breitengrad B [rad], dem Längengrad L [rad] und der Höhe H [m] über dem Referenzellipsoiden des WGS84-Datums sind die Koordinaten des ECEF-Koordinatensystems folgendermaßen zu bestimmen:

$$N = \frac{a^2}{\sqrt{a^2 \cos^2(B) + b^2 \sin^2(B)}} \quad (93)$$

$$X = (N + H) \cos(B) \cos(L) \quad [m] \quad (94)$$

$$Y = (N + H) \cos(B) \sin(L) \quad [m] \quad (95)$$

$$Z = \left(\frac{b^2}{a^2} N + H \right) \sin(B) \quad [m] \quad (96)$$

D.2.3 Transformation ECEF→KS-Kugel

Es wird eine Kugeloberfläche definiert, deren Kugelmittelpunkt mit dem Koordinatenursprung des ECEF-Koordinatensystems zusammen fällt. Der Radius der Kugel entspricht der Länge des Ortsvektors der Referenzposition. An der Referenzposition wird ein lokales kartesisches Koordinatensystem definiert. Die XY-Ebene ist am Koordinatenursprung/Fußpunkt parallel zur Kugeloberfläche. Die X-Achse ist nach Norden, die Y-Achse nach Osten und die Z-Achse zum Koordinatenursprung des ECEF-Koordinatensystems ausgerichtet.

Gegeben: Fußpunkt: $p_{Ref}^e = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$

Gesucht: Längengrad λ_{Ref}^e
Breitengrad φ_{Ref}^e

Aus der Referenzposition p_{Ref}^e lassen sich die sphärischen Koordinaten der Kugel folgendermaßen berechnen. Sie unterscheiden sich etwas von den geografischen Koordinaten, die sich auf den Ellipsoiden beziehen.

Längengrad:

$$\lambda_{Ref}^e = \tan^{-1} \left(\frac{Y}{X} \right) \quad (97)$$

Breitengrad:

$$\varphi_{Ref}^e = \tan^{-1} \left(\frac{\cos(\lambda_{Ref}^e) \cdot Z}{X} \right) \quad (98)$$

D.2.4 Transformation ECEF→NED

Das lokale, kartesische NED-Koordinatensystem wird für eine gegebene ECEF-Position erzeugt. Es zeigt an diesem ECEF-Punkt mit seiner X-Achse nach Norden, mit der Y-Achse nach Osten und mit der Z-Achse in Gravitationsrichtung. Die XY-Ebene des NED-Koordinatensystems ist im Koordinatenursprung parallel zur Oberfläche des WGS84-Referenzellipsoids.

Gegeben: Fußpunkt: $p_{Ref}^e = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$

Gesucht: Richtungskosinusmatrix $C_{ECEF}^{NED} = C_e^n$

Transformation einer beliebigen ECEF-Position in das NED-Koordinatensystem

In einem ersten Berechnungsschritt sind aus der ECEF-Position die Rotationswinkel zu bestimmen. Ist das NED-Koordinatensystem auf den WGS84-Referenzellipsoid bezogen, dann sind der Breitengrad B [rad] und der Längengrad L [rad] nach Anhang D.2.2 zu bestimmen.

In einer ersten Drehung wird um die Z-Achse mit dem Längengrad L gedreht. Anschließend wird, aufgrund der mathematisch positiven Definition der Drehung, um die neu entstandene Y-Achse um den negativen Breitengrad B gedreht. Es wird eine weitere negative Drehung von $90^\circ = \frac{\pi}{2}$ um die Y-Achse vorgenommen, um die X-Achse aus der Vertikalen in Nord-Richtung zu drehen.

Die daraus resultierende Richtungskosinusmatrix ergibt:

$$\mathbf{C}_{ECEF}^{NED} = \mathbf{C}_e^n = R_Y \left(-B - \frac{\pi}{2} \right) R_Z(L) \quad (99)$$

Zusätzlich ist eine Translation zwischen dem Koordinatenursprung des ECEF-Koordinatensystems und dem Fußpunkt des NED-Koordinatensystem notwendig. Eine beliebige ECEF-Position p_2^e lässt sich folgendermaßen in das NED-Koordinatensystem transformieren:

$$p_2^n = \mathbf{C}_e^n (p_2^e - p_{Ref}^e) \quad (100)$$

Wird das NED-Koordinatensystem nicht auf den WGS84-Referenzellipsoiden, sondern auf die in Anhang D.2.3 beschriebene Kugeloberfläche bezogen, dann sind die Drehwinkel Breitengrad B und Längengrad L durch die Winkel Breitengrad φ und Längengrad λ zu ersetzen.

Rücktransformation NED→ECEF

Durch die Drehung in umgekehrter Reihenfolge mit invertierten Winkeln ergibt sich die Richtungskosinusmatrix:

$$\mathbf{C}_n^e = (\mathbf{C}_n^e)^T = R_Z(-L) R_Y \left(B + \frac{\pi}{2} \right) \quad (101)$$

Die Transformation einer beliebigen Position im NED-Koordinatensystem in das ECEF-Koordinatensystem ist:

$$p_2^e = \mathbf{C}_n^e (p_2^n + p_{Ref}^e) \quad (102)$$

D.2.5 Transformation ECEF→KS-MKS

Die Streckendefinition liegt im Basiskoordinatensystem ECEF vor. Das Mehrkörper-simulationsprogramm (SIMPACK) erwartet die Streckendefinition in einem lokalen kartesischen Koordinatensystem, dessen XY-Ebene parallel zur Erdoberfläche (WGS84-Referenzellipsoid) ausgerichtet ist. Zusätzlich fällt der Startpunkt der Gleiskurve mit dem Koordinatenursprung zusammen, und die XZ-Ebene ist in die Richtung der Gleisachse am Startpunkt ausgerichtet.

Alle Positionen der Gleiskurve werden durch Rotation und Translation in das Koordinatensystem der Mehrkörpersimulation KS-MKS transformiert.

Gegeben: Startpunkt $p_{Start}^e = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$

Gesucht: Richtungskosinusmatrix \mathbf{C}_e^{MKS}

Transformation einer beliebigen ECEF-Position in KS-MKS

Um das lokale Koordinatensystem horizontal auszurichten, wird die in Anhang D.2.4 beschriebene Transformation in das NED-Koordinatensystem angewendet:

$$p_{Start}^n = \mathbf{C}_e^n (p_{Start}^e - p_{Start}^e) \quad (103)$$

In einem zweiten Schritt ist das Koordinatensystem mit der XZ-Ebene in Richtung der Gleiskurve am Startpunkt auszurichten. Dies entspricht einer Drehung um die Z-Achse mit einem (mathematisch positiv definierten) Azimutwinkel r_{Start}^n . Der Richtungswinkel des Startpunktes der ersten Primitive ist aus der Trassierung bekannt (siehe Abschnitt 4.7). Alternativ kann (bei Vernachlässigung der Richtungsabweichung bei Start im Bogen) aus der Startposition und der zweiten Position der Gleiskurve p_{Start2}^n ein Azimutwinkel im NED-Koordinatensystem bestimmt werden.

$$r_{Start}^n = \tan^{-1} \left(\frac{Y_{Start2}^n - Y_{Start}^n}{X_{Start2}^n - X_{Start}^n} \right) \quad (104)$$

Daraus ergibt sich die zusammengefasste Richtungskosinusmatrix:

$$\mathbf{C}_e^{MKS} = \mathbf{R}_Z(r_{Start}^n) \mathbf{C}_e^n \quad (105)$$

Ein beliebiger Punkt im ECEF-Koordinatensystem p_2^e wird folgendermaßen in das KS-MKS transformiert:

$$p_2^{MKS} = \mathbf{C}_e^{MKS} (p_2^e - p_{Start}^e) \quad (106)$$

Rücktransformation KS-MKS→ECEF

Aus dem KS-MKS sind alle Positionen und abgeleiteten Größen aus der aus der Mehrkörpersimulation in das ECEF-Basiskoordinatensystem zu transformieren.

Die Richtungskosinusmatrix ergibt sich zu:

$$\mathbf{C}_{MKS}^e = (\mathbf{C}_e^{MKS})^T = \mathbf{C}_n^e \mathbf{R}_Z(-r_{Start}^n) \quad (107)$$

Eine Position wird folgendermaßen transformiert:

$$p_2^e = \mathbf{C}_{MKS}^e (p_2^{MKS} + p_{Start}^e) \quad (108)$$

Abgeleitete Größen und Vektoren wie Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und Winkelgeschwindigkeiten werden in einem statischen Fall (KS-MKS ist erdfest) nur in der Ausrichtung beeinflusst.

$$\vec{v}_{MKS,IMU}^e = \mathbf{C}_{MKS}^e \vec{v}_{MKS,IMU}^{MKS} \quad (109)$$

Beispielhaft wird hier der Geschwindigkeitsvektor des IMU-Sensors von KS-MKS in ECEF transformiert.

D.2.6 Transformation KS-MKS→KS-<Marker>

Innerhalb der Mehrkörpersimulation können Position, Richtung und abgeleitete Größen von Markern an Körpern gegenüber dem KS-MKS „gemessen“ werden. Die Position wird durch einen Ortsvektor beschrieben.

Die Ausrichtung des Markerkoordinatensystems im KS-MKS wird durch die drei Eulerwinkel α_{MKS} , β_{MKS} , γ_{MKS} beschrieben.

Beispielhaft wird der Marker des IMU-Sensors (siehe Abschnitt 5.12.2, 7) verwendet. Die im KS-IMU „gemessene“ Bewegungsbeschleunigung $a_{MKS,IMU}^{IMU}$ wird in das KS-MKS transformiert:

Gegeben: $a_{MKS,IMU}^{IMU}$, $\omega_{MKS,IMU}^{IMU}$

α_{MKS} , β_{MKS} , γ_{MKS}

Gesucht: $a_{MKS,IMU}^{MKS}$, $\omega_{MKS,IMU}^{MKS}$

$$\mathbf{C}_{IMU}^{MKS} = \mathbf{R}_X(\alpha_{MKS}) \mathbf{R}_Y(\beta_{MKS}) \mathbf{R}_Z(\gamma_{MKS}) \quad (110)$$

$$a_{MKS,IMU}^{MKS} = \mathbf{C}_{IMU}^{MKS} a_{MKS,IMU}^{IMU} \quad (111)$$

Die Winkelgeschwindigkeit $\omega_{MKS,IMU}^{IMU}$ berechnet man analog.

Rücktransformation KS-MKS →KS-<Marker>

$$\mathbf{C}_{MKS}^{IMU} = (\mathbf{C}_{IMU}^{MKS})^T = \mathbf{R}_Z(-\gamma_{MKS}) \mathbf{R}_Y(-\beta_{MKS}) \mathbf{R}_X(-\alpha_{MKS}) \quad (112)$$

$$a_{MKS,IMU}^{IMU} = \mathbf{C}_{MKS}^{IMU} a_{MKS,IMU}^{MKS} \quad (113)$$

D.2.7 Transformation ECEF→KS-PCW

Das lokale Koordinatensystem für die Trassierung der Gleisanlagen im Siemens Prüf- und Validationcenter in Wegberg-Wildenrath (PCW, siehe Abschnitt 3.3.2) ist ein horizontal verdrehtes NED-Koordinatensystem nach Anhang D.2.4 mit dem Fußpunkt:

$$p_{RefPCW}^{LLA} = \begin{pmatrix} 51,1155706^\circ \\ 6,2068235^\circ \\ 0,0 \text{ m} \end{pmatrix} \rightarrow p_{RefPCW}^e = \begin{pmatrix} 3,988512472 \cdot 10^6 \\ 4,33771726 \cdot 10^5 \\ 4,941625814 \cdot 10^6 \end{pmatrix} \quad (114)$$

Der Fußpunkt befindet sich (nahezu) senkrecht unter dem Gleis22a. Er wurde bei der Erstellung von [174, 172] festgelegt und als Startpunkt für das dort gezeigte Szenario verwendet.

Die Hauptteil der geraden Rangiergleise des PCW sind (um einen Winkel von $3,7065355^\circ$ in der Gauß-Krüger-Abbildung nach Westen verdreht) in West-Ost-Richtung ausgerichtet.

Zur besseren Implementierung der Gleisanlagen wurde das NED-Koordinatensystem um den Azimutwinkel $\gamma_{NED,PCW} = -3.538^\circ$ gedreht, um in einem lokalen Koordinatensystem zu arbeiten, das (nahezu) parallel zu den Gleisen ausgerichtet ist. Der Winkel wurde aus Messdaten bestimmt.

Daraus ergeben sich die Transformationen für beliebige Positionen p_2 :

$$p_2^{PCW} = R_Z(\gamma_{NED,PCW}) C_e^{NED} p_2^e \quad (115)$$

$$p_2^e = C_{NED}^e R_Z(-\gamma_{NED,PCW}) p_2^{PCW} \quad (116)$$

D.2.8 Transformation ECEF→KS-IFS

Das lokale Koordinatensystem für die Trassierung der Gleisanlagen des Institutes für Schienenfahrzeuge und Fördertechnik der Universität RWTH Aachen ist ein NED-Koordinatensystem nach Anhang D.2.4 mit dem Fußpunkt:

$$p_{RefIFS}^{LLA} = \begin{pmatrix} 50,78011^\circ \\ 6,07099^\circ \\ 0,0 \text{ m} \end{pmatrix} \rightarrow p_{RefIFS}^e = \begin{pmatrix} 4,018348030 \cdot 10^6 \\ 4,273798250 \cdot 10^5 \\ 4,918113794 \cdot 10^6 \end{pmatrix} \quad (117)$$

D.2.9 Sphärisches Koordinatensystem in der Ebene (Skyplot)

In der Satellitennavigation ist es üblich, die Position von Satelliten gegenüber einem Empfänger aus Sicht des Beobachters auf der Erdoberfläche darzustellen. Ein Skyplot ist eine spezielle polare Darstellung eines lokalen kartesischen Koordinatensystems.

Die Position der Empfängerantenne ist in ECEF-Koordinaten bekannt. Zur Vereinfachung wird die Ersatzfläche der Erde als Kugel angenommen. Der Kugelmittelpunkt fällt mit dem Koordinatenursprung des ECEF-Koordinatensystems zusammen. Der Radius der Kugel entspricht dem Abstand zwischen Koordinatenursprung und der Position der Empfängerantenne, sodass die Empfängerantenne auf der Kugeloberfläche liegt.

Aus der ECEF-Position der Empfängerantenne werden die sphärischen Koordinaten der Kugel (Breitengrad φ (Elevation), Längengrad λ (Azimut)) bestimmt, die als Winkel für die Koordinatentransformation dienen:

$$P_{e,Empf}^e = \begin{pmatrix} x_{e,Empf}^e \\ y_{e,Empf}^e \\ z_{e,Empf}^e \end{pmatrix} \quad (118)$$

Aus der Position lassen sich die sphärischen Koordinaten der Kugel berechnen. Sie unterscheiden sich leicht von den geografischen Koordinaten, die sich auf den Ellipsoiden beziehen.

Längengrad:

$$\lambda_{Empf}^e = \arctan\left(\frac{y_{e,Empf}^e}{x_{e,Empf}^e}\right) \quad (119)$$

Breitengrad:

$$\varphi_{Empf}^e = \arctan\left(\frac{\cos(\lambda_{Empf}^e) \cdot z_{e,Empf}^e}{x_{e,Empf}^e}\right) \quad (120)$$

Das ECEF-Koordinatensystem wird nun mit dem Längengrad λ um die Z-Achse (C_{zw}^{kH}) und mit dem Breitengrad $\varphi + \frac{\pi}{2}$ um die Y-Achse (C_e^{kH}) in das Koordinatensystem des künstlichen Horizonts (kH) gedreht:

$$C_e^{kH} = C_{zw}^{kH} \cdot C_e^{zw} \quad (121)$$

$$C_e^{kH} = \begin{pmatrix} \cos(\lambda_{Empf}^e) & -\sin(\lambda_{Empf}^e) & 0 \\ \sin(\lambda_{Empf}^e) & \cos(\lambda_{Empf}^e) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(-(\varphi_{Empf}^e + \frac{\pi}{2})) & 0 & -\sin(-(\varphi_{Empf}^e + \frac{\pi}{2})) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(-(\varphi_{Empf}^e + \frac{\pi}{2})) & 0 & \cos(-(\varphi_{Empf}^e + \frac{\pi}{2})) \end{pmatrix} \quad (122)$$

Die Position der Satelliten im kH-Koordinatensystem wird folgendermaßen berechnet:

$$P_{Sat}^{kH} = C_e^{kH} \cdot (P_{Sat}^e - P_{Empf}^e) \quad (123)$$

Ist die Z-Komponente der Satellitenposition P_{Sat}^{kH} negativ, dann befindet sich der Satellit oberhalb der Erdoberfläche und ist (theoretisch) für die GNSS-Empfängerantenne sichtbar.

Daraus lassen sich der Azimutwinkel (der horizontale Winkel von der X-Achse (Nord-Richtung), positiv im Uhrzeigersinn) und die Elevationswinkel (0° am künstlichen Horizont, positiv zur Vertikalen) des Satelliten im Koordinatensystem kH bestimmen.

Position des Satelliten im kH-Koordinatensystem:

$$P_{Sat}^{kH} = \begin{pmatrix} x_{Sat}^{kH} \\ y_{Sat}^{kH} \\ z_{Sat}^{kH} \end{pmatrix} \quad (124)$$

Azimutwinkel:

$$\lambda_{Sat}^{kH} = \arctan\left(\frac{y_{Sat}^{kH}}{x_{Sat}^{kH}}\right) \quad [rad], [-\pi \dots \pi] \quad (125)$$

Elevationswinkel:

$$\varphi_{Sat}^{kH} = \arctan\left(\frac{\cos(\lambda_{Sat}^{kH}) \cdot z_{Sat}^{kH}}{x_{Sat}^{kH}}\right) \quad [rad], \left[-\frac{\pi}{2} \dots \frac{\pi}{2}\right] \quad (126)$$

Der Elevationswinkel φ_{Sat}^{kH} wird in der Satellitennavigation häufig als Ausschlusskriterium für tief über dem Horizont stehende Satelliten genutzt. Negative Elevationswinkel liegen unterhalb des künstlichen Horizontes.

Diese Arbeit beschreibt und validiert eine Simulationsumgebung, in der ein Schienenfahrzeugmodell und ein Eisenbahninfrastrukturmodell miteinander gekoppelt sind. Den Bezug zwischen allen Modellen stellt das Umgebungsmodell mit dem erd-festen, geografischen Koordinatensystem ECEF und der koordinierten Weltzeit UTC her. Ein MATLAB/Simulink-Zentralmodell fasst die Fahrzeugtechnik- und Steuergerätemodelle sowie die Cosimulationsschnittstellen zusammen. Umfangreiche Sensormodelle erzeugen konsistente physikalische und technische Sensorsignale. Die dreidimensionale Bewegung des Schienenfahrzeuges berechnet das Mehrkörper-Simulationsprogramm SIMPACK. Eine signalgeführte Zugfahrt geben die aktiven Infrastruktursysteme (Leitstelle, Stellwerk) und das Zugleit- und Sicherungssystem ERTMS/ETCS vor. Das Vollbahn-Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ der Universität RWTH Aachen ist als Referenzfahrzeug nachgebildet. Anhand realer Messdaten aus Versuchsfahrten werden die Simulationsergebnisse validiert.

In einem ersten Anwendungsfall wird die Simulationsumgebung als Software-in-the-Loop-Entwicklungsumgebung zur Erforschung von neuer Schienenfahrzeug-Bewegungsmesstechnik (Odometriesysteme) mit Satellitennavigation, elektronischen Wegmarken und Inertialsensorik verwendet.



Daniel Lüdicke erhielt 2004 sein Diplom in Mechatronik von der Technischen Universität Ilmenau. Ab 2009 arbeitete er als wissenschaftlicher Mitarbeiter bei Prof. Torsten Dellmann am Institut für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme der Universität RWTH Aachen. Im Fokus seiner Arbeit stand das Versuchsfahrzeug „IFS-Erprobungsträger 1“ sowie Projekte zur Fahrzeugautomatisierung und erweiterter Odometrie mit Satellitennavigation. Seit 2016 arbeitet er am Institut für Systemdynamik und Regelungstechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) mit dem Forschungsschwerpunkt auf mechatronischen Einzelradfahrwerken.